



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ENERGETICKÁ NÁROČNOST VÝROBY UMĚLÉHO SNĚHU

ENERGY INTENSITY OF ARTIFICIAL SNOW PRODUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Křepela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Radim Křepela**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Energetická náročnost výroby umělého sněhu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je věnována problematice energetické náročnosti výroby umělého sněhu. V rámci stručné rešerše budou představeny využívané způsoby výroby umělého sněhu a parametry běžné zasněžovací techniky. Pozornost bude věnována energetické náročnosti výroby umělého sněhu a v tomto duchu porovnána nabízená komerční řešení. Pozornost bude dále věnována detailu tepelného přenosu v průběhu ochlazování a zmrazení kapičky vody uvolněné z trysky zasněžovací techniky. Práce bude obsahovat konstrukční návrh konkrétní části zasněžovací techniky.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracujte stručnou rešerši k problematice výroby umělého sněhu doplněnou o parametry běžné zasněžovací techniky.
2. Sestavte podrobný přehled energetických toků v zasněžovací technice a proveďte srovnání energetické náročnosti výroby umělého sněhu komerčně nabízenou technikou.
3. Zpracujte detail tepelného přenosu v průběhu ochlazování a zmrazení kapičky vody uvolněné z trysky zasněžovací techniky.
4. Realizujte konstrukční návrh vybraného prvku zasněžovací techniky.

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

KANDLIKAR, S., Masahiro, S. a DHIR, V., Handbook of phase change: boiling and condensation. Philadelphia, PA: Taylor, xlvii, 738 p., 1999. ISBN 15-603-2634-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce informuje o vzniku, historii a přínosu technického zasněžování. Seznamuje o tom, z čeho se sněžná zařízení skládají a jakými procesy se umělý sníh vyrábí. Dále uvádí zjištěnou cenu vyrobené tuny sněhu z jednotlivých komerčně dostupných zařízení. V praktické části se práce zabývá výpočtem zmrznutí kapky pro různé vstupní parametry vody, prostředí a zařízení. Vzorový výpočet byl proveden pro padající kapku ze sněžné tyče. Kapka vypouštěné vody měla velikost 0,3 mm a teplotu 2 °C. Teplota prostředí byla zvolena na -10 °C. Dále také byla stanovena trajektorie kapky ze sněžného děla. V konstrukčním návrhu byla navržena konkrétní sněžná tyč pro zadané parametry, včetně rychlosti proudění prostředí. Výsledky byly následně porovnány se sněžnými tyčemi, které jsou na trhu volně dostupné.

Klíčová slova

Umělý sníh, Sněžné dělo, Sněžná tyč, Snowmaker, Zmrazení kapičky

ABSTRACT

The presented diploma thesis informs about the origin, history, and benefits of technical snowmaking. It introduces what snow equipment consists of and what processes artificial snow is produced. It also shows the price of tons of snow produced from individual commercially available equipment. In the experimental part, the work deals with the calculation of droplet freezing for various input parameters of water, environment, and equipment. A sample calculation was performed for a falling water droplet from a snow lances. The droplet of discharged water was 0.3 mm in size and had a temperature of 2 °C. The temperature of the environment was chosen to be -10 °C. Furthermore, the trajectory of the droplet from a snow gun was determined. In the design, a specific snow pole was designed for the specified parameters, including the speed of the environment. The results were then compared with snow poles available on the market.

Key words

Artificial snow, Snow gun, Snow lances, Snowmaker, Freezing droplets

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘEPELA, Radim. *Energetická náročnost výroby umělého sněhu* [online]. Brno, 2021, 63 s. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132246>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *diplomovou* práci na téma **Energetická náročnost výroby umělého sněhu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych tímto rád poděkoval všem, kteří mi během studia pomohli a podporovali mě v něm.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Historie	12
3	Rozdíl mezi technickým a přírodním sněhem	14
4	Výroba umělého sněhu	16
5	Sněžná zařízení	19
	5.1 Sněžná děla	19
	5.2 Sněžné tyče	21
	5.3 Snowmakery	24
	5.3.1 Snowfactory	24
	5.3.2 SnowMagic.....	25
	5.3.3 Vacuum Ice Maker (VIM).....	26
6	Cena za vyrobený sníh.....	28
7	Detail zmrazení kapičky	30
	7.1 Výpočet.....	30
	7.2 Rychlost kapky	31
	7.3 Model	33
	7.4 Objem vypouštěné vody	35
	7.5 Relativní vlhkost.....	37
	7.6 Vypočítané výsledky.....	39
	7.7 Trajektorie kapičky ze sněžného děla	44
8	Konstrukční návrh	47
9	Závěr.....	52
	Seznám použitých zdrojů.....	54
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK	61
	SEZNAM GRAFŮ	62

1 Úvod

Sníh je neodmyslitelnou součástí zimního období, bez kterého si někteří z nás toto období nedokážou představit. V posledních letech nastávají sněhové srážky vlivem klimatických změn stále méně. Ovlivňuje to zimní a lyžařská střediska, která na tom staví většinu svých zisků. Ke snaze zajistit včasnou zimní sezónu se využívají sněžná zařízení. Tato zařízení produkují umělý sníh a tím dopomáhají k dosažení dostatečné sněhové pokrývky. Díky této pomoci mohou areály otevřít střediska včas a zajistit potřebný komfort. Jsou nákladnou investicí, která ovšem prodlouží sezónu a zajistí ziskovost. Pokud by po vyrobení sněhu byla sezóna nezisková, nevyplatilo by se ho vyrábět a bylo by lepší nechat lyžařská střediska zavřená.

Mezi nejznámější zařízení patří sněžná děla a sněžné tyče. Tyto produkty lze spatřit téměř v každém lyžařském středisku. Můžeme si jich povšimnout podél sněžných tratí, odkud následně sníh vyrábí. Dokážou produkovat velké množství sněhu, ale pouze při záporných teplotách prostředí. Existují také zařízení na výrobu sněhu, která dokážou vyrábět sníh nezávisle na teplotě prostředí. Těmto produktům se říká tzv. snowmakery. Jsou schopné produkovat velké množství umělého sněhu pouze se zdrojem vody a elektřiny.

Velkým tématem je dopad umělého zasněžování na životní prostředí. Dříve byla do vody přidávána aditiva. Bylo to z důvodu, aby šlo vyrobit sníh při vyšších teplotách a déle vydržel. To však mělo nepříznivý vliv na přírodu. V dnešní době je snaha vyrábět umělý sníh bez přidaných aditiv a nenarušovat jimi chod krajiny.

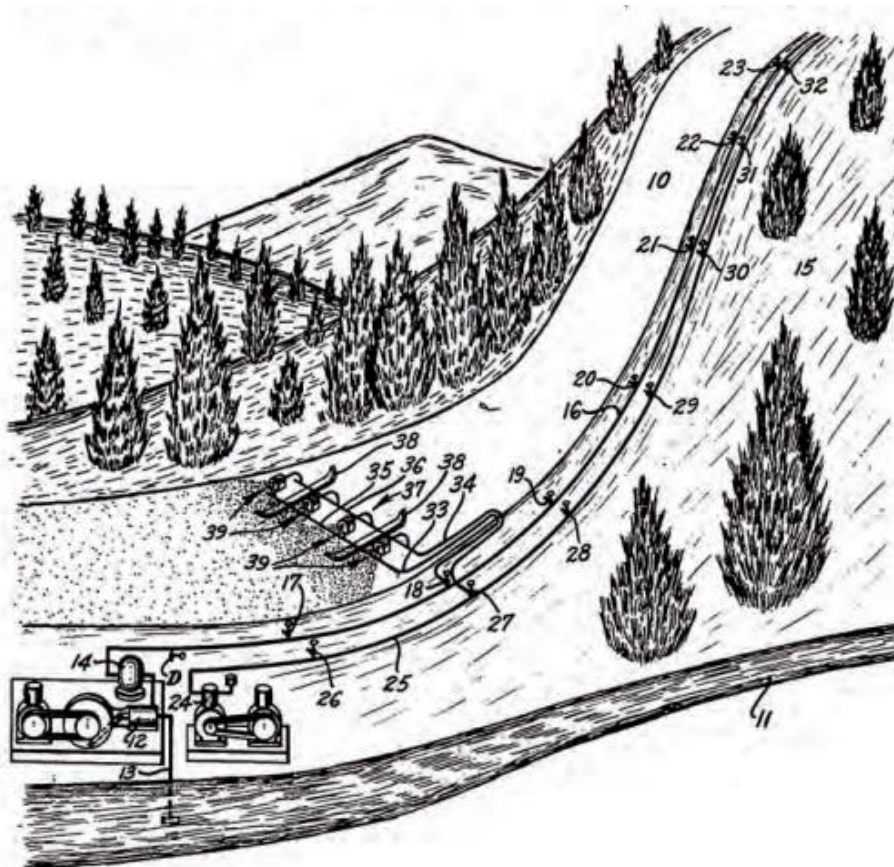
V rešeršní části práce jsou informace o začátcích a rozmachu zasněžování umělým sněhem. Dále jsou porovnány přírodní a umělý sníh a způsoby výroby. Je popsáno z čeho se sněžná zařízení skládají a jak výroba probíhá.

Praktická část se zabývá výpočtem zmrznutí kapky po opuštění sněžného zařízení v závislosti na parametrech prostředí a vypouštění vody. Také se řeší množství vypouštěné a odpařené vody během propadu vzduchem. Je znázorněna trajektorie kapky ze sněžného děla. V konstrukčním návrhu se provádí kontrolní výpočet pro zadané parametry včetně výpočtu rychlosti proudění vzduchu. Následně se volí potřebná výška tyče.

2 Historie

První sněžné dělo vzniklo náhodou ve 40. letech 20. století v Kanadě. Kanadáné při testování leteckých motorů, pro které potřebovali vytvořit námrazu, podtlakem situovali vodní páru do proudu podchlazeného vzduchu a omylem vyrobili umělý sníh. Tento objev nijak nepatentovali, pouze se o něm zmínili v jednom ze svých článků. První pokusy o výrobu umělého sněhu se uskutečnily v Connecticutu v Americe na přelomu 40. a 50. let 20. století. Jednalo se o metodu drcení ledu. Metoda byla velmi nákladná a sníh neměl dobré parametry. Mezi první záznamy o umělém zasněžování patří zmínka z Bostonu o bratřech Tropeanových z roku 1950. Bratři Tropeanové byli majitelé společnosti, která se specializovala na zemědělské zavlažovací systémy. Umělý sníh se jim povedlo vyrobit náhodou, když ošetřovali stromy postřikem proti mrazu. Při ošetřování stromů postřikem došlo ke snížení teploty vzduchu a na stromy místo vody dopadl sníh. [1] [2] [3]

První patent na výrobu a distribuci sněhu byl udělen 27. dubna 1954 Wayne Pierceovi, který byl jako výrobce lyží zasažen předchozími zimami bez sněhu. Umělý sníh vyrobil pomocí hadice, kompresoru a rozprašovače. V jeho dokumentaci lze vidět, že už téměř před sedmdesáti lety byly využívány systémové prvky, které se používají při výrobě sněhu i dnes: zdroj vody, čerpadla, trysky pro rozprašování vody, které jsou přidělovány na pohybujících ližinách, rozvodná síť vody a vzduchu po celé sjezdovce. [1] [3]



Obrázek 1: Prvky zasněžovacího systému z roku 1954 (převzato z [3], upraveno) č. 10 – sjezdovka, č. 11 – zásobárna vody, č. 13 – čerpadlo, č. 17–32 – rozvodná síť, č. 33–37 – pohyblivé zařízení pro instalaci trysek, č. 38 – ližiny, č. 39 – rozprašovací trysky

V Evropě, a to především ve Francii, jsou počátky rozvoje zasněžovací techniky v roce 1963. Bylo to v malém lyžařském středisku Champ de Feu, kde se podařilo zasněžovat 550 m sjezdovky. Instalace zahrnovala čtyři sněžná děla, vodní nádrž, kompresor, vodní čerpadlo a potrubí. Pokusy o zasněžování technickým sněhem se začaly provádět i v dalších evropských zemích. Například byla snaha zasněžovat sjezdovky Mephisto ve městě Flaine, kde bylo zasněžováno přes 14 hektarů s převýšením 600 m. Toto zasněžování ovšem vyvolalo otázky týkající se efektivnosti a investičních nákladů. K většímu rozmachu došlo na konci 80. letech v důsledku teplých a sněhově nedostatečných zim. [3] [4]

V České republice jsou první zmínky spojeny s profesorem Vladimírem Chlumským a zimním střediskem v Telnici. Členové lyžařského klubu Telnice nechali dovézt první sněžné dělo do ČSSR z Rakouska. Tým profesora Chlumského následně dělo přizpůsobil místním podmínkám a vyrobili další tři zařízení. První sníh z těchto děl byl následně vyroben 27. listopadu 1965. Následně se umělé zasněžování rozrůstalo dále po republice např. Špindlerův mlýn (zasněžování skokanských můstků), v Novém Městě na Moravě, Hlinsku či na Šumavě v areálu Špičák. [1] [2] [5]

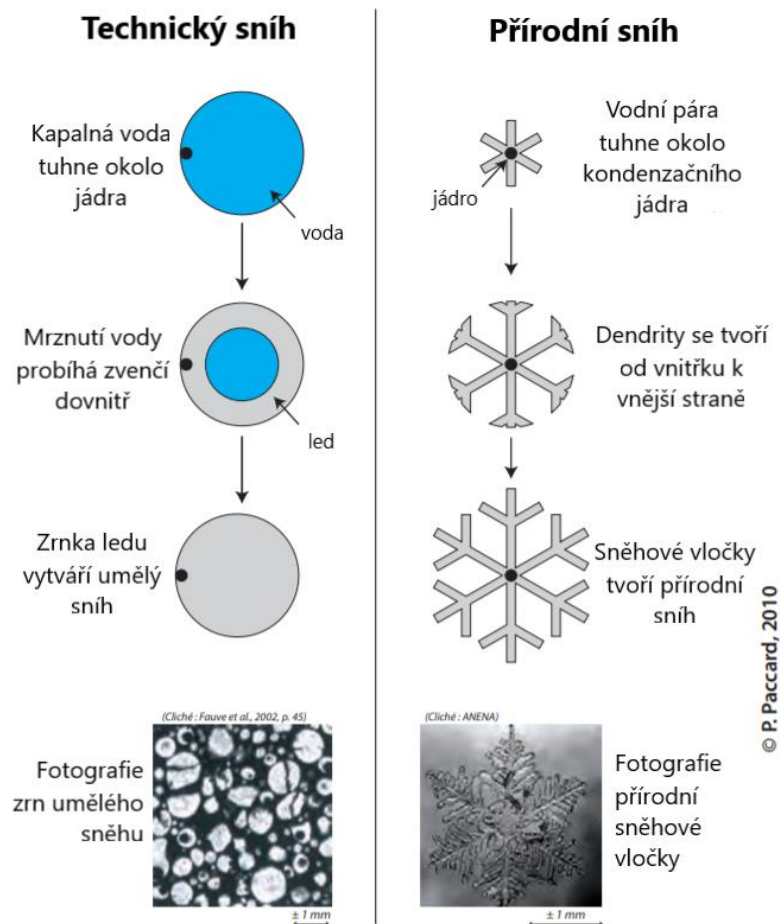
V Evropě se nachází 55 % lyžařských areálů ze všech lyžařských středisek na světě, následuje Asie a Austrálie s 24 % a Severní Amerika s 21 %. V současné době je stále více sjezdových ploch zasněžováno umělým sněhem. V USA je podíl zasněžovaných sjezdovek 66 %. Největší podíl zasněžovaných sjezdovek v Evropě je v Rakousku a v Itálii. V některých zdrojích se uvádí, že v Italských Alpách je podíl až 100 % umělého sněhu. Ve Švýcarsku je podíl 33 % a ve Francii 23 %. V České republice je podíl zasněžovaných sjezdovek umělým sněhem přibližně 70 %. Procentuální zastoupení zasněžovaných ploch je vztaženo k roku 2009. Oproti roku 2004 bylo toto zastoupení navýšeno o 20–30 %. [3] [6] [7]

3 Rozdíl mezi technickým a přírodním sněhem

Přírodní sníh se od technického sněhu liší v mnoha ohledech. Liší se v chemických i fyzikálních vlastnostech. Rozdíl v těchto směrech začíná už u základního parametru, a to při vzniku sněhové vločky. Přírodní sníh vzniká nárůstem od středu vločky a má dendritickou strukturu. Jako zárodky „kondenzačního jádra“ mohou posloužit částičky prachu a pylu, které se vyskytují v atmosféře a na nich kondenzuje vodní pára. Vodní pára na povrchu krystalku se sráží s kapkami přechlazené vody. Kapičky přechlazené vody jsou v kapalně formě, a to i přesto, že je pod bodem mrazu. Prostředí nedovolí kapičce změnit skupenství. Stačí však malá změna podmínek (srážka krystalku s přechlazenou vodou) a dochází k okamžitému zmrznutí. V atmosféře díky turbulentnímu proudění dochází k promíchávání vzduchu. Díky tomu jsou srážky kapiček intenzivnější a krystalek stále více roste, až se z něj stává sněhová vločka.

Přírodní sníh má krystalky velikosti 0,2–5 mm, zatímco technický sníh krystalky velikosti 0,1–0,8 mm. Aby sněhová vločka doputovala na zem ve formě, v jaké jí známe, musí po celou dobu procházet teplotou pod bodem mrazu. Pokud by prošla vrstvou v atmosféře, která je nad bodem mrazu, doputovala by na zem jako déšť se sněhem, případně pokud by procházela delší dobu v teplotách nad bodem mrazu, může dopadat jako tzv. mrznoucí déšť.

Technický sníh mrzne od vnější části kapičky, díky tomu jsou menší a dochází k pravidelné kulovité struktuře. Krystalky technického sněhu stráví ve vzduchu poměrně krátkou dobu. Z tohoto důvodu nestačí pořádně promrznout a obsahují větší podíl vody.



Obrázek 2: Vznik technického a přírodního sněhu (převzato z [3], upraveno)

Jeden z hlavních rozdílů mezi přírodním a technickým sněhem je v čistotě vody, z které sníh vzniká. Přírodní sníh vzniká z velmi čisté oblačné vody, zatímco sníh technický obsahuje nečistoty, minerály a někdy i přísady, aby byla zvýšena teplota, při které lze zasněžovat.

Nejzásadnějším rozdílem je ovšem hustota sněhu. Zatímco čerstvý přírodní sníh má při dopadu hustotu 20–200 kg/m³ a následně po ulehnutí 200–400 kg/m³, technický sníh má hustotu 300–500 kg/m³. Díky větší hustotě má sníh větší tepelnou vodivost. To má za následek větší promrzání půdy. Za normálních podmínek dochází k promrzání půdy výjimečně, při zvýšené tepelné vodivosti může ovšem zem promrznout až na –10 °C. Technický sníh má po dozrání až dvakrát větší tvrdost. Další jeho vlastností je pomalé tání, které na konci sezóny bývá delší až o šest týdnů. Kapitola 3 byla sepsána pomocí zdrojů [3] [4] [8] [9] [10] [11] [12] [13].

4 Výroba umělého sněhu

V současné době jsou podmínky pro lyžování velmi složité. Ať už se jedná o klimatické podmínky, které se vlivem globálního oteplování a dalších dopadů mění nebo náročností požadavků lidí na sníh a sněhové podmínky. Chtějí co nejvyšší kvalitu sněhu, upravené sjezdovky a co nejdelší lyžařskou sezónu. K zajištění co nejdelší lyžařské sezóny nelze spoléhat pouze na přírodní podmínky a přírodní sníh, je důležité vybudovat všechna nezbytně nutná zařízení a požadavky. Jsou potřeba sněžná zařízení, nádrže s vodou, rozvody (vody, elektřiny, vzduchu), měřicí přístroje, kontrolní stanoviště, měřicí přístroje a mnoho dalšího. [3]

Při výrobě umělého sněhu je voda rozprašována pod vysokým tlakem vzduchu. Než voda dopadne na zem, zmrzne v drobné ledové krystalky. Kapičky vody jsou ve vzduchu poměrně krátkou dobu, a proto mají větší vlhkost. Jak rychle a dobře kapičky zmrznou záleží na více faktorech, především na teplotě a vlhkosti. Závislost vlhkosti a teploty můžeme vidět v tabulce níže. [3]

Relativní vlhkost (%)	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
Teplota vzduchu (°C)																			
-9	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-10	-10	-10	-10	-9	-9
-8	-12	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-10	-10	-10	-10	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-8	-8
-7	-10	-10	-10	-9	-9	-9	-9	-9	-9	-8	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-7
-6	-10	-9	-9	-9	-9	-9	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-6
-5	-9	-9	-8	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5
-4	-8	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4
-3	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3
-2	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-3	-2
-1	-6	-6	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1
0	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0
1	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	1
2	-4	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	2	2	2
3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3
4	-2	-2	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4

Obrázek 3: Tabulka závislosti suché teploty na relativní vlhkosti vzduchu (převzato z [3], upraveno) – Modrá barva představuje příznivé podmínky pro produkci sněhu.

Dalšími faktory ovlivňujícími výrobu sněhu jsou atmosférický tlak a vítr. Při nízkém tlaku je chladicí faktor lepší. Mírný vítr je také příznivým faktorem, neboť díky němu je sníh odnášen do větší vzdálenosti, tudíž stráví ve vzduchu delší dobu a může se lépe ochladit. Pokud je ale vítr příliš silný, je nevhodný z toho důvodu, že sníh může být navát na sněžné dělo nebo může být odfouknut mimo požadované místo zasněžování. K vytvoření 1 m³ umělého sněhu je potřeba 250–500 litrů vody, což při vrstvě 20–35 cm představuje spotřebu 70–120 l/m² (tj. 700 000–1 000 000 litrů na hektar sjezdovky). [9] [11] [13]

Mezi dva základní způsoby výroby technického sněhu patří tzv. monokapalinová (nízkotlaká) a bikapalinová (vysokotlaká) technologie. [3] [4]

Monokapalinová technologie pracuje pouze vodou a tlakem, který je 10–65 bar. Voda se do vzduchu rozprašuje a vznikají ledové krystalky. Tento způsob výroby zaručuje dobrou kvalitu sněhu. Sněžná děla pracující s monokapalinovou technologií dokážou vyrábět

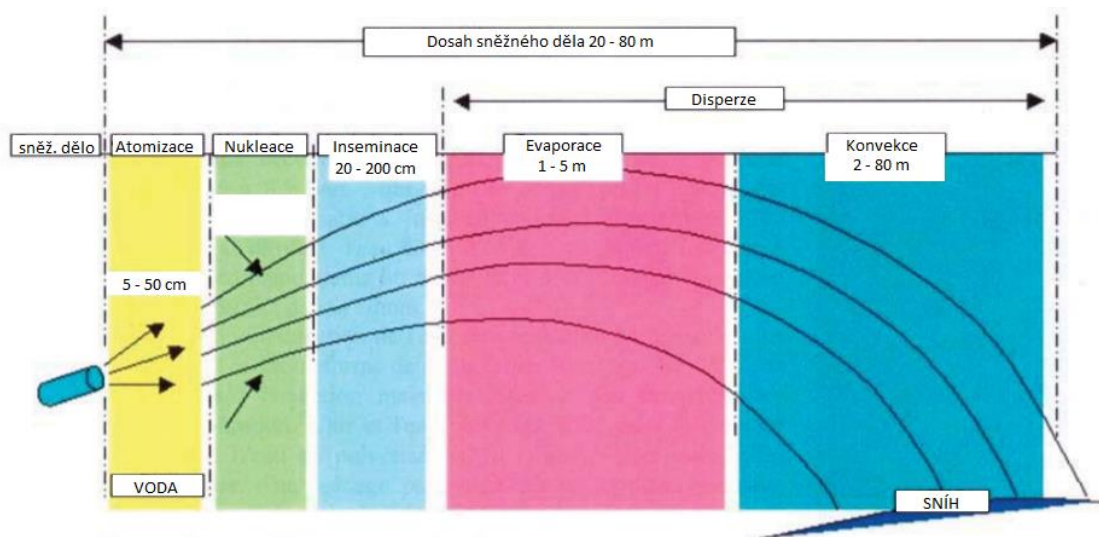
i při nižší kvalitě vody či limitních teplotách. Děla toho typu jsou poznatelná jako klasická či mobilní děla. [3] [13]

Bikapalinová technologie pracuje nejen s vodou, ale i vzduchem. Technologii můžeme rozdělit na dva způsoby. První způsob využívá směšovací komoru, v které je vzduch smíchán s vodou při tlaku 6–12 bar a následně je směs tryskou vypouštěná ven. Druhý způsob stlačuje vzduch samostatně na 15–65 bar. Stlačený vzduch je vypuštěn do okolí, kde se přimíchá k proudu vody a vznikají ledové krystalky. Bikapalinová technologie bývá používána u sněžných tyčí, které jsou vždy upevněny na pevně. [3] [4] [13]

Existuje ještě další technologie, která je nezávislá na klimatických podmínkách. Tato technologie je velmi energeticky náročná (50 kWh/m^3) a proto se zatím příliš nevyužívá. Voda je v kovovém válci ochlazována freony při teplotě -25°C a následně seškrabována. [3]

Výroba technického sněhu se zdá být jako jednoduchý proces, kdy je voda pouze rozprašována do vzduchu. Ve skutečnosti se ale jedná o složitý proces. Ať už u monokapalinové nebo bikapalinové technologie se voda transformuje na sníh v pěti procesech: atomizace, nukleace, inseminace, odpařování a konvekce. Těmito pěti procesy se voda přeměňuje na sníh v závislosti na parametrech zasněžovací techniky a okolního prostředí až do vzdálenosti 80 metrů. [3] [13]

- Atomizace (fragmentace)
 - o Spočívá v rozprašování vody tryskami o průměru kapiček 0,1–0,8 mm. Kapičky jsou vrženy do okolního chladného vzduchu homogenním proudem a vykrystalizují do ledu. Čím menší kapička, tím snazší krystalizace.
- Nukleace
 - o Probíhá současně s atomizací. Uvolňuje se směs vody a vzduchu a atomizované kapičky vody krystalizují.
- Inseminace
 - o Setkává se atomizační tok s nukleačním tokem. Ke spuštění zamrzání jsou nezbytná ledová jádra, aby se narušil rovnovážný stav. Setkáním toků dochází k nabourání rovnovážného stavu kapiček a tím se vyvolá zmrazení.
- Vypařování (evaporace)
 - o Kapičky se rozptylují do vzduchu, při kterém dochází k odpaření vnější části. Odpařováním se snižuje teplota kapičky a tím se usnadňuje její zamrzání. Čím je sušší vzduch, tím dochází k většímu odpařování a lepšímu zamrzání kapiček.
- Konvekce
 - o Posledním procesem přeměny sněhu je konvekce. Při tomto procesu probíhá výměna tepla mezi kapičkami a okolním vzduchem. Čím chladnější je okolní vzduch, tím je produkce sněhu efektivnější. [3] [4] [13]



Obrázek 4: Etapy fází výroby sněhu (převzato z [13], upraveno)

5 Sněžná zařízení

Sněžná zařízení potřebují k produkci sněhu vybudovat nezbytnou infrastrukturu a škálu zařízení. Infrastruktura obsahuje vše, počínaje od zdroje vody až po senzory, které snímají přírodní podmínky. Je nutné zajistit zdroj vody, ze kterého bude čerpána voda na výrobu sněhu. Dále je potřeba mít k zasněžovacím zařízením infrastrukturu pro vodní zdroj, vzduchovody a vedení elektrické sítě. Nutností jsou také čidla pro informace o aktuálních klimatických podmínkách, která jsou rozmístěna podél sněžných tratí. Vybudovat infrastrukturu pro lyžařský areál je velmi nákladná činnost, která zahrnuje spoustu času a především financí. Aby celá tato snaha nepřišla nazmar, snaží se lyžařská střediska zajistit co nejdelší lyžařskou a turistickou sezónu. V tomto ohledu nestačí spoléhat pouze na přírodní sních, který se v posledních letech z důvodu klimatických změn vyskytuje výrazně méně, než tomu bylo v předešlých letech. Prodloužení zimní sezóny se snaží dopomoci tvorbou umělého zasněžování. K umělému zasněžování bývá využito zasněžovacích zařízení, která vyrábí technický sních a zimní sezónu prodlužují. V oblasti zasněžovací techniky dochází ke zdokonalování a zefektivňování sněžných zařízení, která se modernizují, vyvíjí a přizpůsobují. V následujících kapitolách budou popsány tři nejrozšířenější sněžná zařízení.

5.1 Sněžná děla

Sněžná děla pracují na monokapalinové bázi. Skládají se ze tří základních komponent: ventilátor, kompresor a trysky. Obsahují však i spoustu dalších částí, které pomáhají ke zdokonalení a zefektivnění děla. Voda je přivedena do sněžního děla, kde je kompresorem stlačena a směřována do trysek. Před tryskami je filtr, který zajišťuje, aby byla propuštěna pouze voda s částicemi potřebného rozměru. Voda je následně vtlačena do trysek a pod tlakem 10–65 bar rozstříknuta na obrovské množství kapiček do vzduchu. Je vypouštěna nukleátorovými tryskami, díky kterým dochází ke snadnější krystalizaci jader a dýzami rozprašujícími vodu na kapičky. Po sražení těchto dvou toků dochází k efektivnější tvorbě umělého sněhu. Ventilátorová sněžná děla mají vysoký výkon a schopnost produkovat velké množství sněhu. Pojmou až 700 litrů vodního průtoku za minutu, sních rozprašují do vzdálenosti 100 m a pokryjí 360 °, z toho 180 ° automaticky. Díky tomu dokážou pokrýt velkou zasněžovací plochu. Sněžná děla v poslední době snížila svou velikost a hmotnost a díky tomu se dají použít v problematictějších terénech. [3] [14] [15]

Trysky jsou umístěny na kruhovém věnci, na kterém mohou být umístěny i ve více řadách. Jsou zde usazeny dýzy pro rozprašování vody i nukleátorové trysky. Rozprašují vodu rovnoměrně a díky tomu zajišťují kvalitní výrobu sněhu. Bývají vyhřívány, díky tomu nezamrzají a šetří energii. Jsou zasazeny do ventilového bloku, což zajišťuje plynulou regulovatelnost průtoku. Zde zabudovaný filtr zajišťuje průchod správné velikosti částic ve vodě. V nejmodernějších sněžných dělech je každá dýza ovládána samostatným ventilem. To zajišťuje ještě dokonalejší ovládání a regulaci, která směřuje k šetření zdrojů, větší bezpečnosti a spolehlivosti zařízení.

Ve sněžných dělech bývá použit bezolejový kompresor s integrovaným chladícím okruhem. Odpadá potřeba doplňování a kontroly oleje, filtrů, odlučovače a díky tomu jsou ušetřeny provozní náklady. Lze ho používat i v nerovné pozici, což je u sněžných děl nutnost. Kompresory bývají výkonů od 4 do 11 kW. Turbína je poháněna motorem, který je zabudován externě, nebo je uložen ve vnitřním prostoru, což napomáhá ke snížení vibrací a zredukování hluku. U nových sněžných děl mohou být turbína a kompresor poháněny jedním motorem. Výkon turbíny je od 11 do 19 kW.

Některá sněžná děla obsahují meteorologickou stanici, která sbírá aktuální data o počasí a meteorologických parametrech v okolí děla. Tyto informace jsou snímány a parametry děla upravovány v závislosti na aktuálních podmínkách prostředí. Jsou vyráběna z komponentů, které by neměl ohrozit mráz. Pokud by některou z komponent mohl ohrozit mráz, je daná komponenta vyhřívána. Obsahují displej, na kterém lze vidět hodnoty sněžného děla. Např. objem vypouštěné vody, sklon děla a další. Lze ho přehledně a lehce ovládat. Všechny kryty jsou snadno odnímatelné pro snazší dostupnost v případě nutnosti.

Sněžné dělo má více variant montáže. Záleží, ve kterém místě zasněžované oblasti bude dělo využíváno a dle toho se volí optimální řešení. Sněžné dělo může být montováno na podvozku, díky kterému se stává mobilním a flexibilním. U této aplikace se využívá třibodový transportní systém, jehož pomocí může být dělo přepraveno jakýmkoli sněžným vozidlem na sjezdovce. Další možností je instalace na zdvihacím zařízení. Sněžné dělo je prvně přichyceno na zdvihací plošině, která je umístěna na ocelovém sloupu vysokém 3,5–4,5 m. Dělo může být posouváno horizontálně nahoru a dolů. Tento posuv lze provádět manuálně nebo hydraulicky a může být řízen i na dálku. Výška bývá nastavována dle aktuálních klimatických podmínek. Existuje také varianta, kdy je mobilní sněžné dělo na dvoudílném nosném rámu s podpěrami. Toto řešení je mobilní a v případě potřeby může být připevněno na pevně instalované zvedací zařízení. Čtvrtou možností provedení je pevné umístění na věži. Tato možnost bývá často využívána na těžko dostupných úsecích sjezdovky. Dělo je připevněno na ocelovém sloupu o výšce 1,6 m. Vyvýšená pozice dopomáhá ke zlepšení výkonu. Děla na věži mívají zpravidla nízkou hmotnost, díky tomu je jejich montáž poměrně jednoduchá. Poslední možností provedení je montáž na rameni. Rameno je otočné a výškově nastavitelné. Bývá využito u širokých sjezdovek, kde by dělo muselo být umístěno na sjezdovce. Odpadá díky tomu nutnost dovážení a odvážení děla na sjezdovku. [16]



Obrázek 5: Sněžné dělo TechnoAlpin TR10 [17]

Sněžné dělo	TF10 manual	TR10	MMS
Spotřeba elektřiny	27,8 kW	23,3 kW	18,3 kW
Příkon	0,244 kW/m ³	0,219 kW/m ³	0,212 kW/m ³
Produkce sněhu	114 m ³ /h	106,2 m ³ /h	86,25 m ³ /h
Hustota	400 kg/m ³	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Hmotnost	775 kg	708 kg	575 kg
Trysky	24 v., 8 n.	24 v., 8 n.	18 v., 6 n.
Průtok vody	12,6 l/s	11,8 l/s	9,6 l/s
Tlak vody	8–40 bar	8–40 bar	8–40 bar

Tabulka 1: Parametry vybraných sněžných děl od firmy TechnoAlpin [16]

Sněžné dělo	Titan 4.0	Titan X 3.0	Evo 3.0
Spotřeba elektřiny	23 kW	25 kW	16,2 kW
Příkon	0,191 kW/m ³	0,260 kW/m ³	0,231 kW/m ³
Produkce sněhu	120 m ³ /h	96 m ³ /h	70 m ³ /h
Hustota	400 kg/m ³	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Hmotnost	775 kg	773 kg	597 kg
Trysky	84 v., 12 n.	4×90 v., 27 n.	45 v., 10 n.
Průtok vody	12 l/s	9,6 l/s	7,2 l/s
Tlak vody	8–50 bar	8–40 bar	8–50 bar

Tabulka 2: Parametry vybraných sněžných děl od firmy Demaclenko [18]

Sněžné dělo	Supersnow	Standard
Spotřeba elektřiny	24,5 kW	18,5 kW
Příkon	0,245 kW/m ³	0,246 kW/m ³
Produkce sněhu	100 m ³ /h	75 m ³ /h
Hustota	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Hmotnost	515 kg	490 kg
Trysky	300 v., 20 n.	300 v., 20 n.
Průtok vody	11,3 l/s	8,3 l/s
Tlak vody	8–30 bar	8–30 bar

Tabulka 3: Parametry vybraných sněžných děl od firmy Areco [19]

5.2 Sněžné tyče

Technologie sněžné tyče vyžaduje kromě přísunu vody také přísun vzduchu. Z tohoto důvodu je nutné kromě potrubí pro zásobování vodou zajistit také potrubí pro stlačený vzduch, který je dodáván buď z centrálního vzduchového kompresoru nebo kompresorem přímo přimontovaném k tyči. Sněžná tyč bývá zpravidla zabudována napevno a nelze ji tedy přemístit na jiné místo, jako mobilní sněžné dělo. Bývají využívány převážně na užších sjezdovkách, kde nejsou tolik vystaveny větru, pro výrobu kvalitnější vrchní vrstvy sněhu. Pomocí optimalizace a regulace obou tekutin lze dosáhnout ideální velikosti kapiček na konkrétních podmínkách v daný okamžik a zajistit lepší tvorbu umělého sněhu. Ke smíchání tekutin dochází buď po opuštění sněžné tyče, kdy je k proudu vody přimíchán proud vzduchu nebo ve směšovací komoře (tzv. nukleátorové komoře), po které následuje rozstříknutí tekutiny. Někdy jsou také nazývány sněžnými sprchami z důvodu podobnosti principu. Cestou dolů

jsou kapičky ochlazovány studeným vzduchem a odpařování způsobí zmrznutí kapičky na ledové krystalky. Zajištění krystalizace jader a vzniku umělého sněhu je dosaženo dostatečnou výškou konstrukce. Díky neúčasti ventilátoru je dosaženo nižší energetické náročnosti než u sněžných děl. [3] [14] [15]

Děla, která mají spotřebu vzduchu nižší než 500 litrů za minutu jsou označována jako nízkoenergetická. Starší sněžné tyče měly spotřebu vzduchu i nad 1 000 litrů za minutu. Za posledních pět let došlo ke snížení náročnosti spotřeby vzduchu z 900 litrů za minutu na 140 litrů za minutu. Očekává se, že to není konečný stav, přičemž se očekává, že v budoucnu bude spotřeba snížena na přibližně 50 litrů za minutu. [15]

Nově se začínají vyvíjet sněžné tyče, které mají nulovou spotřebu energie. Voda je do tyčí dodávána z nádrže, která je na vyšší nadmořské hladině. Tlaku je dosaženo pomocí potenciální energie a stlačený vzduch je generován pomocí tlaku vody. [20]

Hlava obsahuje nukleátory a dýzy z nichž je vypouštěna směs vody a vzduchu. Nejnovější nukleátory spotřebují malý objem vzduchu a z toho důvodu jsou velmi efektivní. Lze upravit počet spuštěných okruhů a díky tomu regulovat výrobu sněhu k daným podmínkám. Do některých novějších hlav bývá zabudován motor, kterým je řízeno otevírání a zavírání dýz. Tvarem a zapuštěním dýz se snižuje tvorba nežádoucího ledu.

Konstrukce se skládá z násuvného podstavce, otočného sloupu a výsuvného ramene. Jako materiál je použita pozinkovaná ocel. Tyč se skládá z více válcových dílů, které se do sebe zasouvají, což zajišťuje snadnou montáž. Otočná a výsuvná část umožňuje nastavit sněžnou tyč na potřebné místo a parametry, jaké jsou v danou situaci potřeba. Vše je ovládáno pomocí hydrauliky (hydraulického válce). Sněžná tyč může být také na mobilním podvozku. Této konstrukce se využívá ovšem pouze na předváděcí akce nebo na zjištění optimální pozice tyče na zasněžovaném místě. Tyče bývají vybaveny meteorologickou stanicí, která sbírá a informuje o aktuálních klimatických podmínkách přímo u tyče.

Jako systém ventilů bývá použit automatický ventil, který reguluje tlak vody, její průtok a zároveň také průtok vzduchu. Otevírací a zavírací okruh zajišťuje vypuštění vody a odvzdušení. V případě výpadku elektrické energie se ventil automaticky uzavře. Ventilový blok je nad zemí a má dobrou přístupnost. Vodní filtr bývá namontovaný na konstrukci u ventilového systému. Lze se k němu jednoduše dostat, čistit ho nebo vyměnit. Vodní filtr má jednodušší konstrukci, čímž zajišťuje bezporuchovost, jednoduché čištění a dlouhou životnost. Sněžná tyč může mít přívod vzduchu z centrálního vzduchového kompresoru nebo je vybavena přímo kompresorem, který je namontovaný u tyče a stlačí vzduch na potřebnou hodnotu. [21]

Sněžná tyč	EOS 4	EOS 8
Spotřeba energie	1,8 kWh	1,8 kWh
Příkon	0,0364 kW/m ³	0,0295 kW/m ³
Produkce sněhu	49,5 m ³ /h	61 m ³ /h
Hustota	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Trysky	12 v., 4 n.	16 v., 4 n.
Spotřeba vzduchu	3,25–5 l/s	3,25–5 l/s
Průtok vody	5,6 l/s	6,9 l/s
Tlak vody	-	-

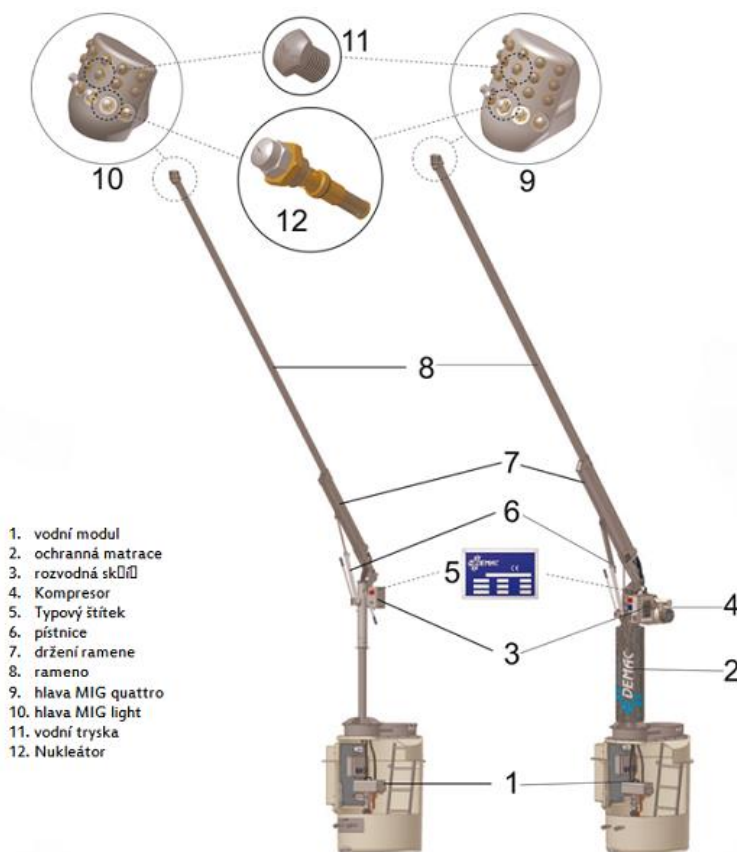
Tabulka 4: Parametry vybraných sněžných tyčí od firmy Demaclenko [22]

Sněžná tyč	Supersnow S10-2	Supersnow S10-4
Spotřeba energie	4 kWh	4 kWh
Příkon	0,1096 kW/m ³	0,0727 kW/m ³
Produkce sněhu	36,5 m ³ /h	55 m ³ /h
Hustota	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Trysky	6 v., 2 n.	10 v., 2 n.
Spotřeba vzduchu	10–11,67 l/s	10–11,67 l/s
Průtok vody	4,06 l/s	6,08 l/s
Tlak vody	20–90 bar	20–90 bar

Tabulka 5: Parametry vybraných sněžných tyčí od firmy Sufag [23]

Sněžná tyč	NESSy	NESSy MEDUSA	NESSy ZeroE
Spotřeba energie	1,8 kWh	2,2 kWh	0 kWh
Příkon	0,0514 kW/m ³	0,0373 kW/m ³	0 kW/m ³
Produkce sněhu	35 m ³ /h	59 m ³ /h	30 m ³ /h
Hustota	400 kg/m ³	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Trysky	9 v., 3n.	18 v., 6n.	35 v., 3n
Spotřeba vzduchu	2,58 l/s	5,17 l/s	0 l/s
Průtok vody	4,16 l/s	7,06 l/s	3,55 l/s
Tlak vody	10–60 bar	10–60 bar	20–60 bar

Tabulka 6: Parametry vybraných sněžných tyčí od firmy Bächler [24]



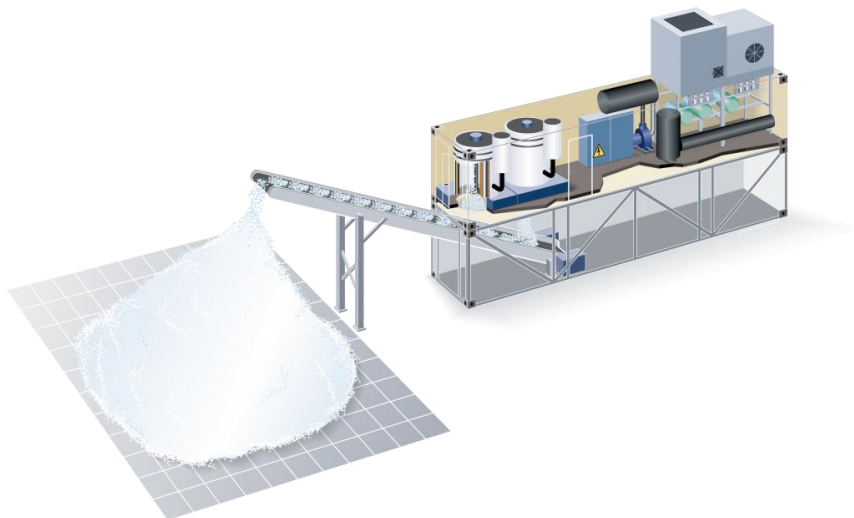
Obrázek 6: Sněžná tyč VIS UP [25]

5.3 Snowmakery

Snowmakery jsou zařízení schopná vyrábět sněh při teplotách až $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při výrobě bývá používáno v každém makeru speciálních postupů, přičemž některé firmy si svůj způsob výroby hlídají patentováním daného postupu. Původně byly určeny na ochlazování prostředí v afrických dolech na zlato, kde dosahují teploty až $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. V současné době jsou používány jako doplněk při výrobě sněhu, hlavně tam, kde je nutné zajistit sněh. Kupříkladu na velkých sportovních akcích, kde je zapotřebí mít zajištěnou dostatečnou sněhovou pokrývku. Jako zajímavost v použití snowmakerů může být uveden zastřešený lyžařský areál Ski Dubai z roku 2005, který se nachází v obchodním centru Mall of the Emirates v Dubaji. Teplota uvnitř areálu je udržována na $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, při venkovních teplotách až $+41\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v plánu je i venkovní areál. Tento trend se stává stále více populárním a umělý sněh se jako atrakce a lákadlo rozmáhá i v dalších vnitřních prostorách za účelem zpříjemnění a zvýšení návštěvnosti a tržeb. [26] [11]

5.3.1 Snowfactory

Jedním z nejvýznamnějších a nejvyužívanějších snowmakerů je Snowfactory od firmy TechnoAlpin. Sněh vyrábí pomocí technologie chlazení vody. Voda je ve výměníku tepla ochlazena pomocí vygenerovaného chladu až na bod mrazu, a to bez přítomnosti chemických aditiv. Sněh se snaží být vyráběn z co nejčistší vody, čemu dopomáhá soustava filtrů. Chladicí okruh nepřichází do přímého kontaktu s vodou, a tudíž se chladicí směs nedostane na sjezdovky, kde by znečišťovala přírodu. Z tohoto důvodu dokáže Snowfactory vyrábět sněh při jakékoli teplotě. Vyrobeny jsou suché ledové šupinky o teplotě $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, které jsou dokonale zmrzlé a neobsahují vlhkost. Takto vyrobený sněh do sebe následně absorbuje okolní vlhkost, díky čemuž se stává celistvějším a výrazně se zvyšuje jeho trvanlivost. Snowfactory bývá dodáván v kontejneru, který se doveze přímo na místo, kde je následně použit. Po dodání na místo, stačí napojit na zdroj vody a elektřiny a může být vyráběn sněh. Ten je možné díky pneumatickému dopravníkovému systému rozvádět do vzdálenosti 200 m s 50 m převýšením, avšak zpravidla bývá produkován na hromadu a následně sněžnou technikou rozhrnut na potřebná místa. Nebývá použit jako náhradní zdroj pro výrobu nedostatku sněhu, jak tomu je u sněžných děl a tyčí, ale především jako doplněk právě těchto zmíněných sněžných zařízení. Pomáhá vyrobit množství sněhu při vyšších teplotách a tím umožňuje prodloužení sezóny. [27] [28]



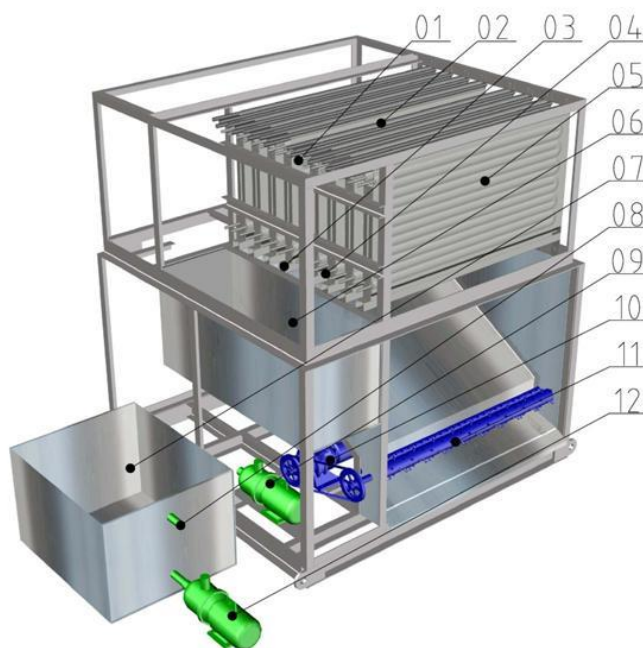
Obrázek 7: Schéma výroby sněhu pomocí Snowfactory [29]

Snowfactory	SF100 standard	SF100 mobile	SF210
Instalace	Pevná	Mobilní	Pevní
Spotřeba energie	87 kW	130 kW	184 kW
Příkon	20,9 kW/m ³	31,2 kW/m ³	21,2 kW/m ³
Hmotnost	17 000 kg	17 000 kg	35 500 kg
Hustota	450 kg/m ³	450 kg/m ³	450 kg/m ³
Produkce sněhu	100 m ³ /d	100 m ³ /d	207 m ³ /d
Produkce sněhu	45 t/d	45 t/d	97 t/d
Průtok vody	1 l/s	1 l/s	2 l/s
Tlak vody	4–10 bar	4–10 bar	4–10 bar
Chladivo	R717	R717	R717

Tabulka 7: Parametry vybraných modelů Snowfactory od firmy TechnoAlpin [27]

5.3.2 SnowMagic

Snowmakery SnowMagic používají k výrobě ledu deskové generátory. Využívají speciální proces tvorby ledu nazvaný Infinite Crystals Snowmaking (ICS), na který vlastní patent, a proto tuto technologii využívají jako jediní na trhu. Přístroj vyrábí kusy ledu, které jsou následně drceny na menší a menší kusy. Ty poté odpovídají požadované velikosti 0,1 až 0,3 mm a hustotě přibližně 490 kg/m³. Led je vyráběn bez chemických a bakteriálních přísad a z tohoto důvodu ho lze po rozpuštění znovu využít. Modely SnowMagic se od sebe liší pouze rychlostí a množstvím produkovaného sněhu. [30]



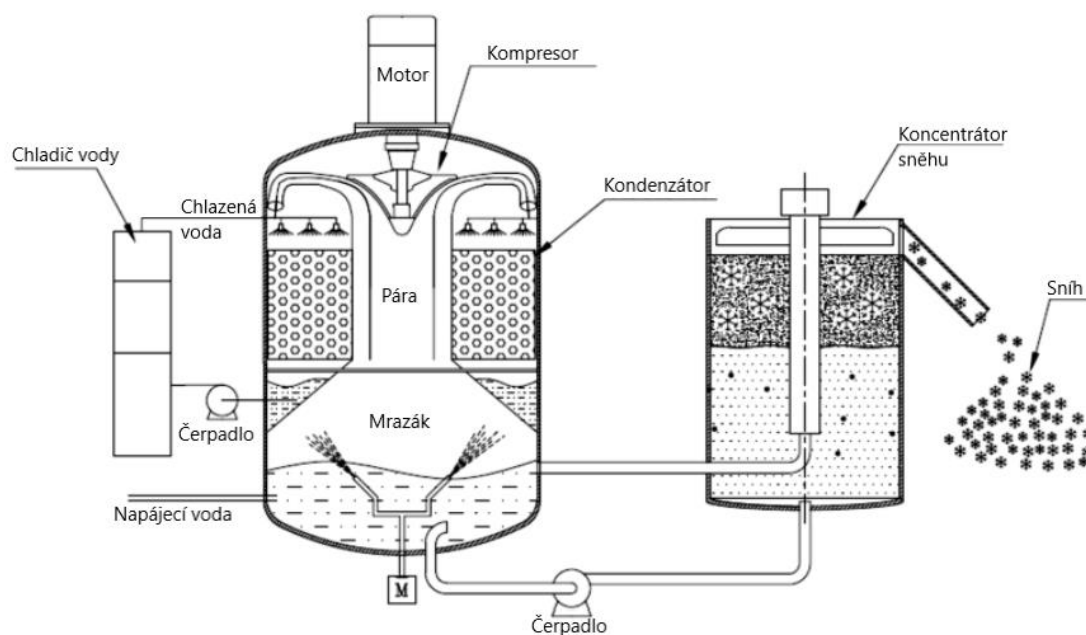
Obrázek 8: Schéma výroby sněhu pomocí SnowMagic [31]

SnowMagic	SnowMagic 50	SnowMagic 100	SnowMagic 150	SnowMagic 200
Spotřeba energie	151 kW	248 kW	248 kW	545 kW
Příkon	35,5 kW/m ³	21,2 kW/m ³	29,0 kW/m ³	32,1 kW/m ³
Hustota	490 m ³ /kg	490 m ³ /kg	500 m ³ /kg	490 m ³ /kg
Produkce sněhu	102 m ³ /d	204 m ³ /d	300 m ³ /d	408 m ³ /d
Produkce sněhu	50 t/d	100 t/d	150 t/d	200 t/d
Průtok vody	0,75 l/s	1,5 l/s	3,3 l/s	3 l/s
Chladivo	Voda	Voda	Voda	Voda

Tabulka 8: Parametry vybrané techniky SnowMagic [32]

5.3.3 Vacuum Ice Maker (VIM)

Významným snowmakerem je Vacuum Ice Maker od společnosti IDE Technologies, který na této technologii funguje více než 30 let. Voda je uvnitř mrazáku ve vakuu, které malou část vody vypaří. Zbývající voda zmrzne a vytvoří směs vody a ledu. Tato směs se následně odčerpá do koncentrátoru ledu, kde je voda oddělena od ledových krystalků. K zajištění vakua uvnitř mrazáku je vodní pára nepřetržitě odváděna z mrazáku, stlačována a přiváděna do kondenzátoru pomocí odstředivého kompresoru IDE. K zajištění kondenzace páry je dodávána chladicí voda pomocí chladiče vody. Snowmakerem VIM lze vyrábět kvalitní sněh za jakékoliv teploty, aniž by byla omezena kvalita sněhu. Metoda je také velmi ekologická, neboť nejsou použité žádné aditivní přísady. Technologie je víceúčelová a bývá využívána k chlazení hlubokých dolů. Lze ji dopravit do dolu a výrazně snížit energetické náklady ve srovnání s řešením vodou. [33] [34]



Obrázek 9: Princip výroby by sněhu pomocí VIM [35]

IDE Technologies	VIM400	VIM850
Spotřeba energie	235 kW	397 kW
Příkon	6,6 kW/m ³	5,5 kW/m ³
Hustota	650 m ³ /kg	650 m ³ /kg
Produkce sněhu	860 m ³ /d	1 720 m ³ /d
Produkce sněhu	650 t/d	1 120 t/d
Průtok vody	6,5 l/s	12,9 l/s
Chladivo	Voda	Voda

Tabulka 9: Parametry vybraných modelů VIM od firmy IDE Technologies [33]

6 Cena za vyrobený sníh

Z parametrů, které o sněžných zařízeních známe, lze vypočítat spotřebu energie na výrobu jedné tuny sněhu:

$$P_{t, \text{ sněhu}} = \frac{m_{t, \text{ sněhu}}}{\rho_{\text{sněhu}}} \cdot P_{m^3 \text{ sněhu}} \text{ [kW]} \quad (1)$$

Po dosazení do vzorce získáme potřebný příkon na výrobu jedné tuny sněhu. Následně můžeme dle tarifu pro cenu elektřiny a vody zjistit cenu za 1 tunu vyrobeného sněhu. Průměrná cena za 1 kWh v roce 2020 činí 4,76 Kč. Pokud bychom jako zdroj vody vzali pitnou vodu z vodovodního zdroje, stačí nám započítat pouze vodné, protože následně sníh roztaje a je vstřebán do země. Vodné čítá v roce 45,27 Kč za m³ vody. [36] [37]

	Příkon na tunu sněhu	Cena na tunu sněhu (přírodní zdroj)	Cena na tunu sněhu (placená voda)
TF10 manual	0,6097 kWh	2,90 Kč	48,17 Kč
TR10	0,5485 kWh	2,61 Kč	47,88 Kč
MMS	0,5304 kWh	2,53 Kč	47,80 Kč
Titan 4.0	0,4792 kWh	2,28 Kč	43,02 Kč
Titan X 3.0	0,6510 kWh	2,60 Kč	43,84 Kč
Evo 3.0	0,5786 kWh	2,64 Kč	44,66 Kč
Supersnow	0,6125 kWh	2,92 Kč	48,02 Kč
Standard	0,6167 kWh	2,94 Kč	48,96 Kč

Tabulka 10: Ceny za tunu vyrobeného sněhu pomocí vybraných sněžných děl

	Příkon na tunu sněhu	Cena za tunu sněhu (přírodní zdroj)	Cena za tunu sněhu (placená voda)
EOS 4	0,0909 kWh	0,43 Kč	46,53 Kč
EOS 8	0,0738 kWh	0,35 Kč	46,44 Kč
Supersnow S10-2	0,2740 kWh	1,30 Kč	46,62 Kč
Supersnow S10-4	0,1818 kWh	0,87 Kč	45,91 Kč
NESSy	0,1286 kWh	0,61 Kč	49,04 Kč
NESSy MEDUSA	0,0932 kWh	0,44 Kč	49,20 Kč
NESSy ZeroE	0 kWh	0 Kč	48,21 Kč

Tabulka 11: Ceny za tunu sněhu vyrobeného pomocí vybraných sněžných tyčí

	Příkon na tunu sněhu	Cena za tunu sněhu (přírodní zdroj)	Cena za tunu sněhu (placená vody)
SF 100 standard	46,4 kWh	221,08 Kč	307,99 Kč
SF 100 mobile	69,3 kWh	330,03 Kč	416,95 Kč
SF210	47,1 kWh	224,25 Kč	307,47 Kč
VIM400	10,1 kWh	48,04 Kč	93,44 Kč
VIM850	8,5 kWh	40,57 Kč	85,62 Kč
SnowMagic 50	72,5 kWh	345,15 Kč	403,82 Kč
SnowMagic 100	43,2 kWh	205,75 Kč	264,42 Kč
SnowMagic 150	57,9 kWh	275,70 Kč	361,75 Kč
SnowMagic 200	65,4 kWh	311,44 Kč	370,66 Kč

Tabulka 12: Ceny za tunu vyrobeného sněhu pomocí vybraných snowmakerů

Z tabulek vyplývá, kolik stojí vyrobit tunu sněhu pomocí vybraných sněžných zařízení. Vezmeme-li v úvahu, že snowmakery jsou schopny vyrobit za den desítky až stovky tun sněhu, dostáváme se na částky v desetitisících korun, a to pouze za jeden den produkce sněhu. Z tohoto důvodu jsou snowmakery využívány, jak už bylo zmíněno na výše, především jako doplněk tradičnějších sněžných zařízení. V porovnání s nimi je cena za vyrobený sníh pomocí sněžných děl příznivější a to především, když vezmeme jako zdroj vody přírodní zdroj. Dostáváme se na ceny nižší, a to v hodnotách řádu stovek korun na tunu vyrobeného sněhu.

Sněžná zařízení vyrábí desítky tun technického sněhu za den. Náklady na takto vyrobený sníh jsou proto za celou zimní sezónu velmi vysoké, ale je nutnost do nich investovat. Bez této investice by lyžařská a zimní střediska nemohla se stále teplejšími klimatickými podmínkami a menšími sněhovými srážkami otevřít svoje areály včas. Lyžařská sezóna by byla kratší a nezisková. Sněžná zařízení se stále vyvíjí. Jdou kupředu jak s technologiemi, tak ekonomickými náklady a stala se nezbytnou součástí pro včasnou zimu se sněhem.

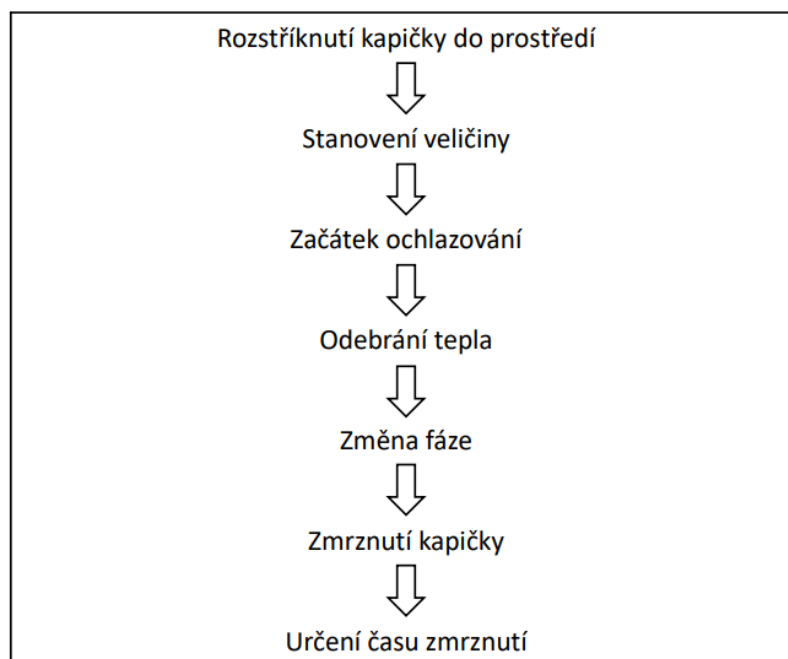
7 Detail zmrazení kapičky

Tato část diplomové práce je zaměřená na detailní přenos v průběhu ochlazování a zmrazení kapičky vody uvolněné z trysky zasněžovací techniky. Kapičky vody jsou pod tlakem rozstříkovány tryskou do proudu vzduchu. Ten je hnaný ventilátorem do prostředí, které má jiné klimatické podmínky, a to hlavně teplotu. V závislosti na trysce sněžného zařízení je kapička rozstříknuta o velikosti dle trysky. Kapičky mají velikost 0,1–0,8 mm a teploty těsně nad bodem mrazu, aby nedocházelo k zamrznutí vody v potrubí. Po opuštění vody ze sněžného zařízení musí být dosaženo kompletního zmrazení kapičky před dopadem na zem. Ke kompletnímu zmrazení dochází tehdy, dosáhne-li celá kapička teplotu 0 °C a nižší. Je tedy potřeba, aby kapička strávila ve vzduchu dostatečnou dobu, aby došlo k jejímu zmrazení a na zem dopadla ve formě technického sněhu. [11]

7.1 Výpočet

Pro výpočet se uvažuje několik zjednodušujících předpokladů:

- Kapička má kulovitý tvar. Kulovitý tvar se využívá a v mnohé literatuře. Můžeme tento předpoklad vidět i na Obrázek 2 na straně 14.
- Voda v kapičce neproudí, tudíž se vnitřní atomy chovají zafixovaně.
- Tepelný tok je ze všech stran stejný.
- Padá kolmo dolů



Obrázek 10: Diagram uvažovaného postupu

Vzorový výpočet je prováděn pro kapičku, která je rozstříknuta ze sněžné tyče. Byla zvolena kapička o velikosti 0,3 mm a teplotě 2 °C. Teplota prostředí byla zvolena na –10 °C a relativní vlhkost 100 %. Rychlost vzduchu 3 m/s.

Pro výpočet času potřebného na zmrznutí kapičky je nejprve třeba určit, případně dopočítat vlastnosti a informace o tekutinách a látkách při zvolených parametrech.

Prvním krokem je určit součinitel přestupu tepla na povrchu kapičky. Součinitel přestupu tepla se vypočítá dle vzorce odvozeného z Nusseltova čísla. To obsahuje součinitel přestupu tepla, tepelnou vodivost a charakteristický rozměr. Tím je v tomto případě průměr koule:

$$Nu = \frac{\bar{\alpha} \cdot d}{\lambda} \Rightarrow \bar{\alpha} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (2)$$

Nusseltovo číslo se pro malou kouli obtékanou tekutinou vypočítá dle rovnice, která je uvedena v [38]:

$$Nu = 2 + (0,4 \cdot Re_d^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot Re_d^{\frac{2}{3}}) \cdot \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_w}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot Pr^{0,4} \quad (3)$$

Rovnice musí splňovat podmínky:

- $0,3 < Re_d < 8 \times 10^4$
- $0,7 < Pr < 380$

Z rovnice vyplývá, že abychom byli schopni vypočítat Nusseltovo číslo, musíme znát Prandtlovo číslo, dynamické viskozity tekutin a Reynoldsovo číslo. To se vypočítá dle rovnice:

$$Re_d = \frac{v \cdot d}{\nu_{vz}} \quad (4)$$

Abychom určili Reynoldsovo číslo, potřebujeme znát, jakou rychlostí se kapka pohybuje, její charakteristický rozměr a kinematickou viskozitu.

7.2 Rychlost kapky

Pohyb kapky by se v ideálním prostředí, kde na něj nepůsobí žádné odporové síly, dal popsat pohybovými rovnicemi pro vrh nebo volný pád. V pohybu ve vzduchu na kapku ovšem působí aerodynamický odpor. Aerodynamický odpor udává silové působení na těleso proti směru jeho pohybu a ovlivňuje jeho rychlost i směr. Vypočítá se pomocí vztahu:

$$F_o = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_{vz} \cdot S \cdot v^2 \quad (5)$$

Ze vztahu lze vidět, že závisí na čelním obsahu a rychlosti. C udává koeficient odporu vzduchu, který je pro každé těleso různý a dá se vyčíst z tabulek pro aerodynamický odpor. Pro kouli je koeficient odporu $C = 0,5$. Odporová síla je důležitou složkou pohybu, která u některých pohybů mění trajektorii. Například se díky odporové síle mění křivka pro šikmý vrh na balistickou křivku. [39]

Krom odporové síly na těleso zároveň působí síla gravitační:

$$F_g = \rho_k \cdot V_k \cdot g \quad (6)$$

$$F_g = \rho \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3\right) \cdot g$$

$$F_g = 999,9 \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot 0,0003^3\right) \cdot 9,81$$

$$F_g = 1,38672 \cdot 10^{-7} N$$

Po určité době se gravitační síla působící na těleso anulovala s odporovou silou. Tomuto stavu odpovídá nulové zrychlení a rychlost by přestala růst. Z tohoto stavu lze vypočítat mezní rychlost, které by kapička dosáhla a dále by se její rychlost nezvyšovala. [40]:

$$F_g = F_o$$

$$F_g = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_{vz} \cdot S \cdot v^2$$

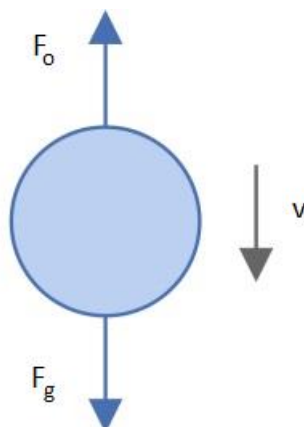
$$v_{voda}^2 = \frac{2 \cdot F_g}{C \cdot \rho_{vz} \cdot S}$$

$$v_{voda} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_g}{C \cdot \rho_{vz} \cdot S}} \quad (7)$$

$$v_{voda} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,38672 \cdot 10^{-7}}{0,5 \cdot 1,351 \cdot 7,06858 \cdot 10^{-8}}}$$

$$v_{voda} = 2,410 \text{ m/s}$$

Kapička v průběhu letu zamrzá, tím se mění její skupenství a materiálové hodnoty. Musíme tedy provést výpočet i pro kompletně zmrzlou kapičku s vlastnostmi ledu ($v_{led} = 2,312 \text{ m/s}$). Následně získáme pomocí lineární interpolace střední rychlost, s kterou poté počítáme ($v = 2,361 \text{ m/s}$).



Obrázek 11: Rychlost kapky s odporovými silami (převzato z [38], upraveno)

Po vypočtení rychlosti lze vypočíst Reynoldsovo číslo dle rovnice (4):

$$Re_d = \frac{2,361 \cdot 0,0003}{0,0000111}$$

$$Re_d = 63,71$$

Reynoldsovo i Prandtlovo číslo splňují podmínky pro použití rovnice (3) a můžeme tedy vypočíst Nusseltovo číslo:

$$Nu = 2 + (0,4 \cdot 63,71^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot 63,71^{\frac{2}{3}}) \cdot \left(\frac{0,0000162}{0,0016735}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot 0,72^{0,4}$$

$$Nu = 3,195$$

Následně, když už známe všechny potřebné hodnoty, vypočteme z Nusseltova čísla součinitel přestupu tepla:

$$\bar{\alpha} = \frac{3,195 \cdot 0,556}{0,0003}$$

$$\bar{\alpha} = 5\,921,84 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

7.3 Model

Nejprve je nutné určit tepelný tok, který nastává mezi kapičkou a prostředím při letu kapičky ve vzduchu. Z druhého termodynamického zákona víme, že teplo je předáváno z místa s větší teplotou do místa s nižší teplotou, a to i při teplotách pod bodem mrazu. Součinitel přestupu tepla byl vypočítán v rovnici výše. Tepelný tok, který je kapičce odebrán je vypočítán dle Newtonova ochlazovacího zákona.:

$$\dot{Q} = \bar{\alpha} \cdot A \cdot (T_w - T_{\infty}) \quad (8)$$

$$\dot{Q} = 5\,921,84 \cdot 2,827 \cdot 10^{-7} \cdot (2 - (-10))$$

$$\dot{Q} = 0,02009 \text{ W}$$

K zamrznutí kapičky dojde v okamžiku, kdy celý její objem bude mít teplotu 0 °C a nižší. Následně dojde ke změně skupenství z kapalného na pevné. Ke změně fáze je potřeba dodat nebo odebrat teplo. Tomuto teplu se říká latentní teplo. Je to potřebná energie na změnu fáze. Podle změny skupenství, ke kterému má dojít, je třeba energii dodat nebo odebrat. Latentní teplo je různé dle prováděné změny. Pro přeměnu z vody na led je potřeba odebrat teplo 334 kJ na kilogram vody. [41]

Je nutné tedy kapičku ochladit na 0 °C. K ochlazení dojde, je-li jí odebráno potřebné teplo. Při odebrání tepla na 0 °C nedochází ke změně fází, a proto ho lze vypočítat pomocí hmotnosti a entalpií:

$$Q_{2 \rightarrow 0} = m_{voda} \cdot (i_{voda,2} - i_{voda,0}) \quad (9)$$

$$Q_{2 \rightarrow 0} = \rho_{voda} \cdot V_{kapky} \cdot (i_{voda,2} - i_{voda,0})$$

$$Q_{2 \rightarrow 0} = 999,9 \cdot 1,4137 \cdot 10^{-11} \cdot (8\,493,1 - 61)$$

$$Q_{2 \rightarrow 0} = 0,000119194 \text{ W}$$

Z tepelného toku a tepla potřebného na ochlazení na 0 °C, můžeme vypočítat čas na odebrání tohoto tepla:

$$\tau_{2 \rightarrow 0} = \frac{Q_{2 \rightarrow 0}}{\dot{Q}} \quad (10)$$

$$\tau_{2 \rightarrow 0} = \frac{0,000119194}{0,02009}$$

$$\tau_{2 \rightarrow 0} = 0,0059 \text{ s}$$

Celá kapička má 0 °C, a proto musíme přepočítat vypočtené hodnoty pro tuto teplotu kapičky. Změní se nám součinitel přestupu tepla ($\alpha = 4\,421,734 \text{ W/m}^2\text{K}$). Následně můžeme určit čas, za který dojde k přeměně fáze u kapičky pomocí rovnice, jež je převzata a upravena z [38]:

$$\tau_f = (r_f - r_i) \cdot \left(\frac{\rho_k \cdot L_f}{\alpha \cdot (T_s - T_\infty)} \right) \quad (11)$$

$$\tau_f = (0,00015 - 0) \cdot \left(\frac{1002,28 \cdot 334\,000}{4421,734 \cdot (0 - (-10))} \right)$$

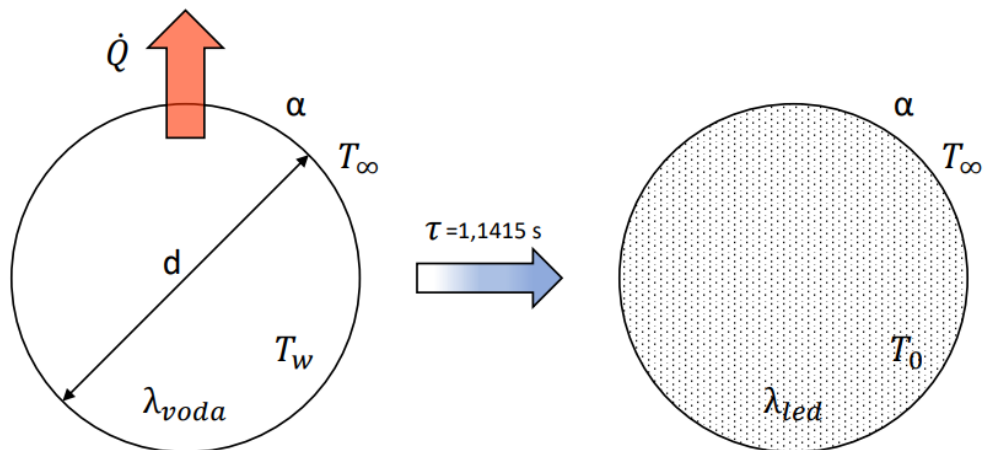
$$\tau_f = 1,1356 \text{ s}$$

Následně se oba časy sečtou a tím získáme celkový čas na zmrznutí kapičky:

$$\tau_{celk} = \tau_{2 \rightarrow 0} + \tau_f \quad (12)$$

$$\tau_{celk} = 0,0059 + 1,1356$$

$$\tau_{celk} = 1,1415 \text{ s}$$



Obrázek 12: Zmrznutí kapičky

7.4 Objem vypouštěné vody

Velmi důležitý údaj je množství vody, které může být při daných podmínkách vypouštěno. K určení možného objemu vypouštěné vody je nejprve třeba určit množství chladu, které se nachází ve vzduchu a vymění se při zadaném proudění. Na toto určení je potřeba zjistit, z jaké výšky kapka padá:

$$h = v \cdot \tau_{celk} \quad (13)$$

$$h = 2,361 \cdot 1,1415$$

$$h = 2,695 \text{ m}$$

Pokud bychom uvažovali, že voda propadáva v průřezu o ploše 1 m², určíme objem vzduchu, kterým se voda pohybuje:

$$V_{vz} = S_{1m} \cdot h \quad (14)$$

$$V_{vz} = 1 \cdot 2,695$$

$$V_{vz} = 2,695 \text{ m}^3$$

Chladicí výkon, který je obsažen v 1 m³ vzduchu se vypočítá:

$$Q_{ch,1} = V_{vz,1} \cdot c_{p,vz} \cdot \rho_{vz} \cdot (T_w - T_\infty) \quad (15)$$

$$Q_{ch,1} = 1 \cdot 1\,010 \cdot 1,351 \cdot (2 - (-10))$$

$$Q_{ch,1} = 16\,372,784 \text{ W}$$

Při rychlosti vzduchu 3 m/s dostaneme objem vzduchu, z kterého následně vypočítáme celkové množství chladicího výkon v něm obsaženém.:

$$Q_{ch} = V_{vz} \cdot v_{vz} \cdot Q_{ch,1} \quad (16)$$

$$Q_{ch} = 2,695 \cdot 3 \cdot 16\,372,784$$

$$Q_{ch} = 132\,373,96 \text{ W}$$

Následně zjistíme množství chladu, které je odebráno kapičce během jejího pádu a přeměny:

$$Q_k = \dot{Q} \cdot \tau_{celk} \quad (17)$$

$$Q_k = 0,02009 \cdot 1,1415$$

$$Q_k = 0,0229 \text{ W}$$

Z chladicího výkonu a tepla, které je odebráno kapičce během její přeměny můžeme určit množství kapiček, které lze vypouštět:

$$n_k = \frac{Q_{ch}}{Q_k} \quad (18)$$

$$n_k = \frac{132\,373,96}{0,0229}$$

$$n_k = 5\,780\,522,27$$

Z objemu jedné kapičky a celkového počtu kapiček vypočteme množství vody, které je možno vypouštět:

$$V_{voda} = V_k \cdot n_k \quad (19)$$

$$V_{voda} = 1,4137 \cdot 10^{-11} \cdot 5\,780\,522,27$$

$$V_{voda} = 8,172 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Objem kapky převedeme na dm^3 , které se rovnají litrům. Toto množství je 0,0817 litrů vody za sekundu.

7.5 Relativní vlhkost

Relativní vlhkost udává, kolik procent vody se nachází ve vzduchu. Je to poměr mezi aktuálním množstvím vody ve vzduchu ku maximálnímu možnému množství. Objem vody, který dokáže vzduch pojmout je pro každou teplotu jiný. Maximální vlhkost 100 % odpovídá tzv. rosnému bodu, což je bod, od kterého už vzduch nedokáže vlhkost přijímat. [42]

Relativní vlhkost ovlivňuje, jestli se kapka letící prostředím začne odpařovat. Sněžná zařízení bývají provozována převážně v noci z důvodu, že jsou prázdné sjezdovky a také bývá vyšší relativní vlhkost. V zimních měsících bývá v nočních hodinách více než 80 % a to převážně kolem 90–95 %. V některých dnech dosahuje hodnoty až 100 %. Pro výpočet byla uvažována relativní vlhkost 100 % a tudíž se z kapičky žádné množství neodpařilo. Přesto byl proveden výpočet zjišťující, jaké množství by se odpařilo, pokud by k odparu docházelo. Stoprocentní vlhkost má také tu výhodu, že se voda neodpařuje a ze stejného množství vody jsme schopni vyrobit více technického sněhu, než kdyby docházelo u kapičky k odparu.

Odpar kapičky lze vypočítat pomocí následujících rovnic, které byly převzaty z [43]. Nejprve je potřeba určit teplo, které je do kapičky dodáváno a díky kterému dochází k odpaření kapičky. Toto teplo se dodává ve formě radiačního záření a vypočítá se:

$$Q_{rad} = \frac{\sigma \cdot (T_{\infty}^4 - T_k^4)}{R_t} \quad (20)$$

Abychom mohli tedy určit dodávané teplo, je potřeba určit odpor, který těleso vůči tomuto teplu má:

$$R_t = \frac{1 - \varepsilon}{A - \varepsilon} \quad (21)$$

$$R_t = \frac{1 - 0,871}{2,827 \cdot 10^{-7} \cdot 0,871}$$

$$R_t = 523\,723,26$$

Když je vypočítán odpor, dopočteme dodané teplo dle rovnice (20):

$$Q_{rad} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (263,15^4 - 275,15^4)}{523\,723,26}$$

$$Q_{rad} = 0,000101373 \text{ W}$$

Ze známého tepla a latentního tepla, které je potřebné na změnu z kapalně fáze na pevnou určíme množství vypařené vody za jednotku času. [41]:

$$\dot{m}_{odpar} = \frac{Q_{rad}}{L_v} \quad (22)$$

$$\dot{m}_{odpar} = \frac{0,000101373}{2\,500\,000}$$

$$\dot{m}_{odpar} = 4,055 \cdot 10^{-11} \text{ kg/s}$$

Ze zjištěného množství vypařované vody a doby letu se vypočítá množství odpařené vody:

$$m_{odpar} = \frac{\dot{m}_{odpar}}{\tau_{celk}} \quad (23)$$

$$m_{odpar} = \frac{4,055 \cdot 10^{-11}}{1,1415}$$

$$m_{odpar} = 3,552 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$$

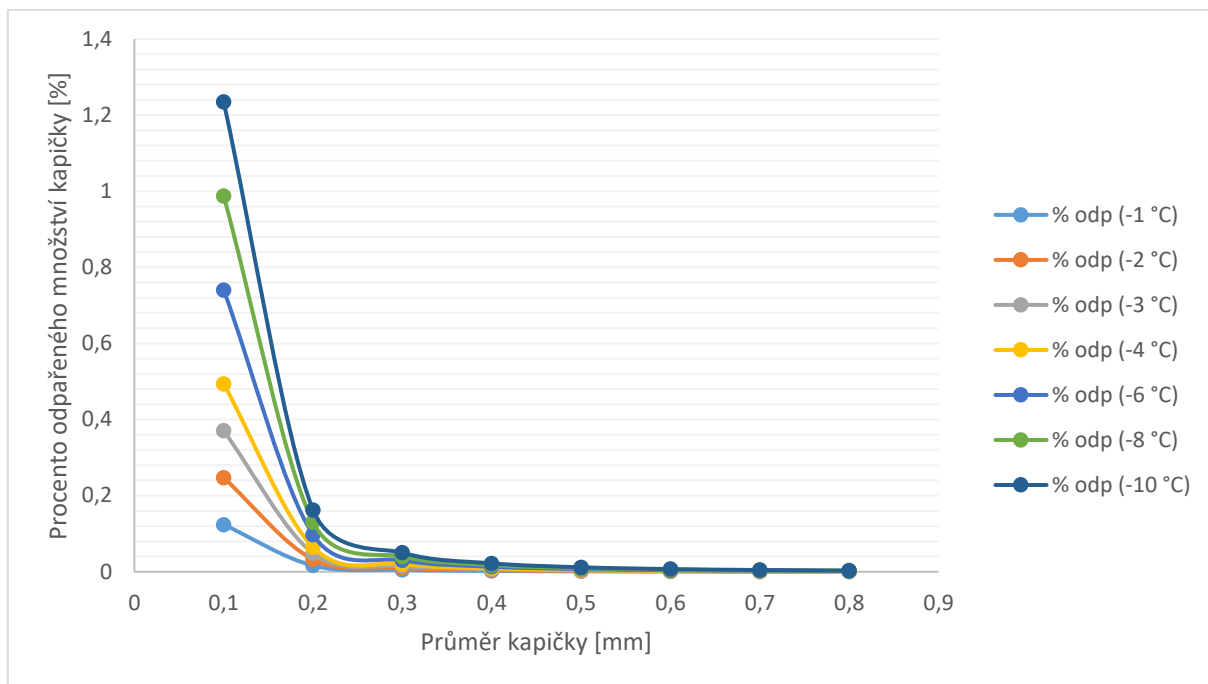
Protože kapičky jsou velmi malých hmotností, je lepší jejich úbytek přepočítat na úbytek procentuální a zjistit, jak velké množství se odpaří ve srovnání s původním množstvím:

$$\%_{odpar} = \frac{m_{odpar}}{m_{voda}} \cdot 100 \quad (24)$$

$$\%_{odpar} = \frac{3,552 \cdot 10^{-11}}{1,41358 \cdot 10^{-8}} \cdot 100$$

$$\%_{odpar} = 0,2513 \%$$

Procentuální odpar je tedy 0,2513 procent. Ten by nastal, pokud by voda byla vstřikována do vzduchu s 0% relativní vlhkostí. V zimních měsících, a to převážně když se zasněžuje, jak už bylo zmíněno na začátku kapitoly 7.5, je relativní vlhkost téměř vždy nad 80 %. Proto než bude vzduch plně nasycen, dokáže pojmout pouze 20 % vlhkosti z kapičky. Vypařená část vody je tedy pětkrát menší a to maximálně 0,05 % celkové hmotnosti kapky.



Graf 1: Závislost odpařeného procenta hmotnosti kapičky na okolní teplotě vzduchu při 80 % relativní vlhkosti a teplotě vypouštěné vody 2 °C

Na Graf 1 lze vidět, že odpar vody při 80 % relativní vlhkosti je téměř vždy pod 1 %. Pouze u kapičky o průměru 0,1 mm a teplotě -10 °C je odpar větší než 1 %. Nejvíce procentuálního odpařeného množství je právě u malých kapiček. Toto množství je převážně ovlivněno teplotou prostředí, v kterém se pohybuje. Nejlépe to lze vidět na rozdílu při teplotách prostředí -1 °C a -10 °C . Zatímco při jednom stupni pod nulou je odpar přibližně 0,1 % objemu kapky, při mínus deseti je to přes 1,2 %. Při mírně větších průměrech kapičky je odpar už vždy pod 0,2 %. Pokud vezmeme kapky průměru 0,3 až 0,8 mm, je odpar pod 0,05 %, při výše zmíněných teplotách prostředí. Toto množství je zanedbatelné, a proto lze při provádění výpočtů odpar zanedbat.

7.6 Vypočítané výsledky

Čas zmrznutí je ovlivněn parametry vody i prostředí, v kterém se následně kapka pohybuje. Tyto veličiny se mění v závislosti na klimatických podmínkách, a to hlavně v závislosti na teplotě. Výpočet byl proveden pro zvolené průměry kapiček, které mohou být průměru 0,1–0,8 mm a pro vybrané teploty prostředí v rozmezí -1 °C až -10 °C . Z Obrázek 3 na straně 16 je však patrné, že při 100 % vlhkosti jsou ideální podmínky pro zasněžování od -4 °C méně. Z výsledků, které byly získány z výpočtů lze určit, jak moc které faktory ovlivňují vypočítané hodnoty.

Všechny výpočty byly provedeny v softwaru Microsoft Excel. Hodnoty fyzikálních vlastností a materiálových parametrů byly převzaty z [44] a z programu Steam Calculator.

Rychlost byla vypočtena dle rovnice (7) pro kapičku vody a následně pro kuličku technického sněhu. Poté se pomocí aproximace určila střední hodnota rychlosti.

v (voda)							
d	v (-1 °C)	v (-2 °C)	v (-3 °C)	v (-4 °C)	v (-6 °C)	v (-8 °C)	v (-10 °C)
mm	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0,1	1,4139	1,4113	1,4088	1,4063	1,4013	1,3964	1,3915
0,2	1,9995	1,9959	1,9923	1,9888	1,9818	1,9748	1,9679
0,3	2,4489	2,4445	2,4401	2,4358	2,4271	2,4186	2,4102
0,4	2,8277	2,8227	2,8176	2,8126	2,8026	2,7928	2,7830
0,5	3,1615	3,1558	3,1502	3,1446	3,1334	3,1224	3,1115
0,6	3,4632	3,4570	3,4508	3,4447	3,4325	3,4204	3,4085
0,7	3,7407	3,7340	3,7273	3,7207	3,7075	3,6945	3,6816
0,8	3,9990	3,9918	3,9847	3,9776	3,9635	3,9496	3,9358

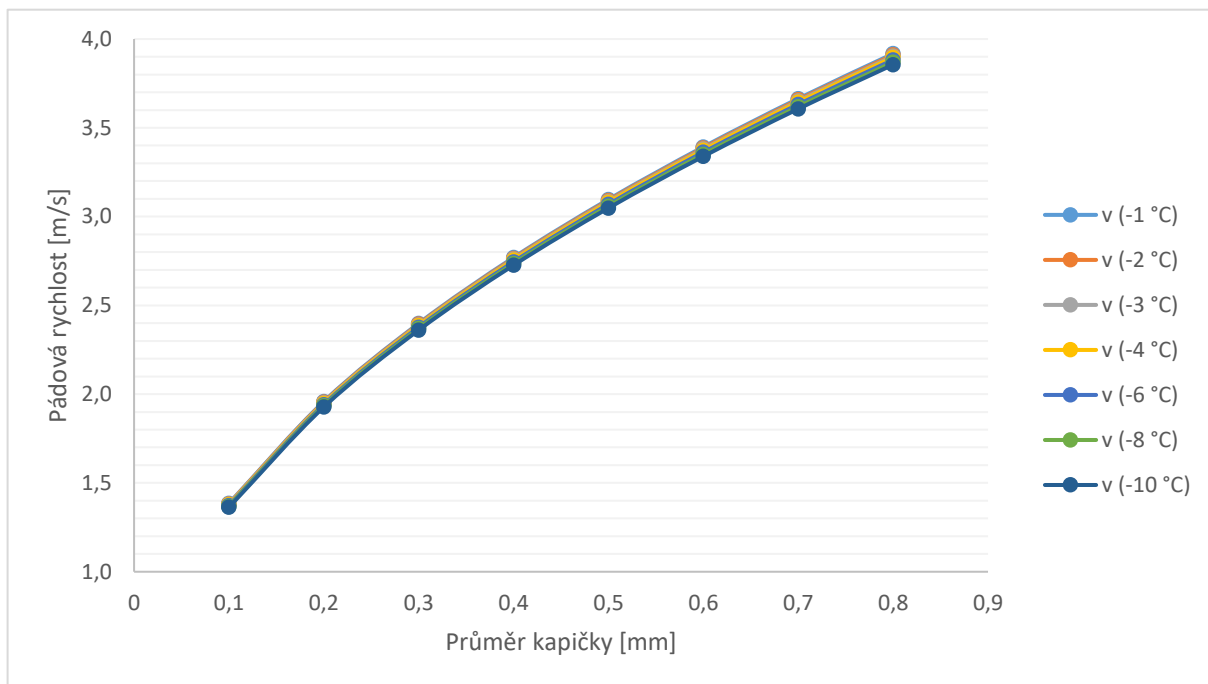
Tabulka 13: Pádová rychlost kapičky vody v závislosti na teplotě prostředí

v (led)							
d	v (-1 °C)	v (-2 °C)	v (-3 °C)	v (-4 °C)	v (-6 °C)	v (-8 °C)	v (-10 °C)
mm	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0,1	1,3562	1,3538	1,3513	1,3489	1,3442	1,3394	1,3348
0,2	1,9180	1,9145	1,9111	1,9077	1,9009	1,8942	1,8876
0,3	2,3490	2,3448	2,3406	2,3364	2,3282	2,3200	2,3119
0,4	2,7124	2,7075	2,7027	2,6979	2,6883	2,6789	2,6695
0,5	3,0325	3,0271	3,0217	3,0163	3,0056	2,9951	2,9846
0,6	3,3220	3,3160	3,3101	3,3042	3,2925	3,2809	3,2695
0,7	3,5882	3,5817	3,5753	3,5690	3,5563	3,5438	3,5314
0,8	3,8359	3,8290	3,8222	3,8154	3,8019	3,7885	3,7753

Tabulka 14: Pádová rychlost umělého sněhu v závislosti na teplotě prostředí

v (střední)							
d	v (-1 °C)	v (-2 °C)	v (-3 °C)	v (-4 °C)	v (-6 °C)	v (-8 °C)	v (-10 °C)
mm	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0,1	1,3850	1,3825	1,3801	1,3776	1,3727	1,3679	1,3631
0,2	1,9587	1,9552	1,9517	1,9482	1,9413	1,9345	1,9278
0,3	2,3989	2,3946	2,3904	2,3861	2,3777	2,3693	2,3610
0,4	2,7701	2,7651	2,7601	2,7552	2,7455	2,7358	2,7263
0,5	3,0970	3,0915	3,0859	3,0804	3,0695	3,0587	3,0481
0,6	3,3926	3,3865	3,3805	3,3745	3,3625	3,3507	3,3390
0,7	3,6644	3,6579	3,6513	3,6448	3,6319	3,6192	3,6065
0,8	3,9175	3,9104	3,9034	3,8965	3,8827	3,8690	3,8555

Tabulka 15: Střední pádová rychlost kapičky v závislosti na teplotě prostředí



Graf 2: Závislost střední pádové rychlosti na teplotě prostředí

Mezní rychlost padající kapičky nejvíce ovlivňuje hustota vzduchu. S nižší teplotou roste hustota vzduchu a pohyb kapky v prostředí se zpomaluje. V závislosti na teplotě se rychlost s měnící se hustotou liší na výše zmíněných deseti stupních celsia o necelou jednu desetinu metru za sekundu. Tuto malou změnu v mezní rychlosti lze vidět na Graf 2, kde je vidět, jak jsou křivky měnící se rychlosti v závislosti na průměru kapky a teploty prostředí téměř totožné a překrývají se.

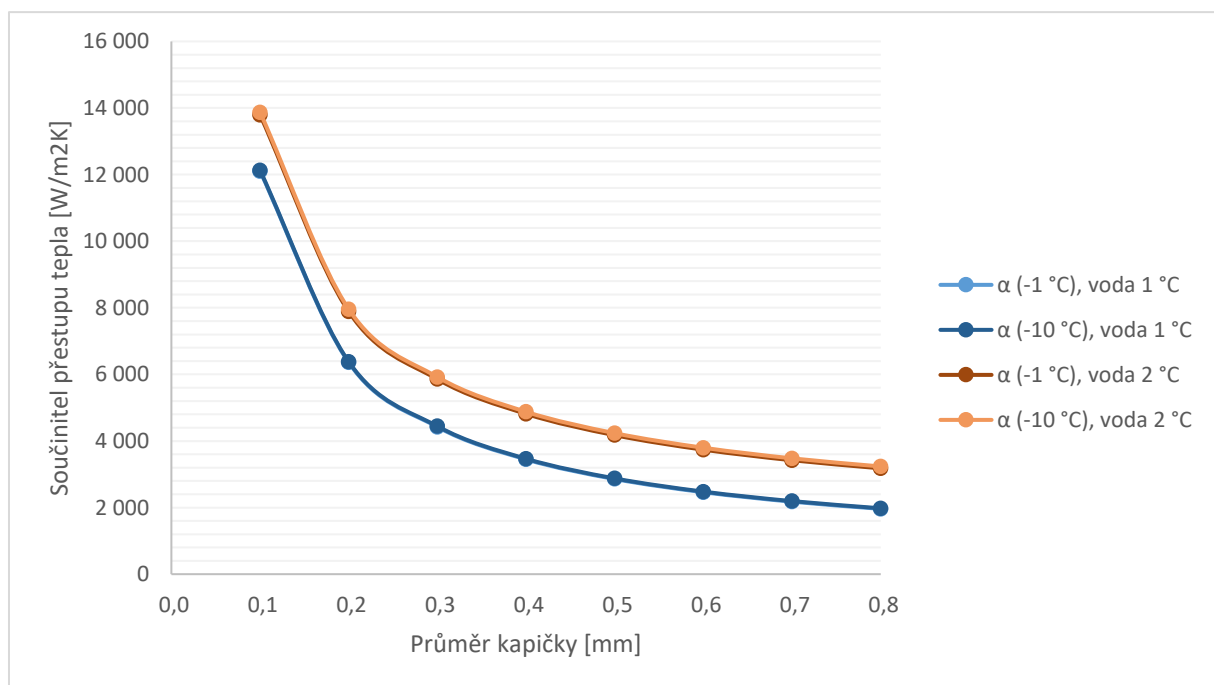
Důležitým faktorem, který ovlivňuje rychlost předávaného tepelného toku je součinitel přestupu tepla. Ten byl vypočítán dle rovnice (2), přičemž došlo k přepočítání všech parametrů na podmínky dle zvolených teplot. Výsledky součinitele přestupu tepla lze vidět v Tabulka 16, Tabulka 17 a Graf 4.

α (voda 1 °C)							
d	α (-1 °C)	α (-2 °C)	α (-3 °C)	α (-4 °C)	α (-6 °C)	α (-8 °C)	α (-10 °C)
mm	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
0,1	12 104,64	12 107,16	12 109,73	12 112,35	12 117,75	12 123,37	12 129,22
0,2	6 357,52	6 359,74	6 362,00	6 364,31	6 369,06	6 374,02	6 379,17
0,3	4 422,94	4 425,01	4 427,11	4 429,26	4 433,69	4 438,30	4 443,11
0,4	3 447,44	3 449,40	3 451,41	3 453,46	3 457,67	3 462,06	3 466,63
0,5	2 857,61	2 859,50	2 861,43	2 863,40	2 867,46	2 871,69	2 876,10
0,6	2 461,54	2 463,38	2 465,26	2 467,17	2 471,11	2 475,21	2 479,49
0,7	2 176,71	2 178,50	2 180,33	2 182,19	2 186,04	2 190,04	2 194,21
0,8	1 961,69	1 963,44	1 965,23	1 967,06	1 970,82	1 974,74	1 978,82

Tabulka 16: Součinitel přestupu tepla v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 1 °C

α (vody 2 °C)							
d	α (-1 °C)	α (-2 °C)	α (-3 °C)	α (-4 °C)	α (-6 °C)	α (-8 °C)	α (-10 °C)
mm	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
0,1	13 794,15	13 802,32	13 810,64	13 819,14	13 836,64	13 854,87	13 873,85
0,2	7 886,77	7 893,96	7 901,30	7 908,78	7 924,21	7 940,26	7 956,99
0,3	5 856,45	5 863,15	5 869,98	5 876,95	5 891,31	5 906,26	5 921,84
0,4	4 814,65	4 821,03	4 827,53	4 834,17	4 847,84	4 862,08	4 876,91
0,5	4 174,88	4 181,03	4 187,29	4 193,68	4 206,85	4 220,57	4 234,85
0,6	3 739,16	3 745,12	3 751,20	3 757,40	3 770,18	3 783,49	3 797,35
0,7	3 421,66	3 427,47	3 433,40	3 439,45	3 451,91	3 464,89	3 478,41
0,8	3 179,02	3 184,71	3 190,51	3 196,43	3 208,63	3 221,33	3 234,57

Tabulka 17: Součinitel přestupu tepla v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 2 °C



Graf 3: Ukázka závislosti součinitele přestupu tepla v závislosti na teplotě prostředí a teploty vypouštěné vody

Reynoldsovo číslo, které je důležité pro výpočet Nusseltova čísla a následně z něj vycházející součinitel přestupu tepla ovlivňuje kinematická viskozita. Ta klesá s teplotou a dochází ke zvýšení Reynoldsova čísla až o tři desítky. Velice důležitý parametr je teplota vody, která je ze zasněžovací techniky vypouštěna. Musí být zajištěno, aby voda v trubkách nezamrzala, ale zároveň byla co nejbližší nad teplotou mrznutí. Rozdíl mezi Nusseltovým číslem pro 1 °C a 2 °C vystupující vody může být pár desetin, ale i více než jedna. Rozdíl není příliš markantní. Pokud ovšem následně vyjádříme součinitel přestupu tepla, dostáváme se na rozdíly, které jsou větší než tisíc W/m²K. Tyto rozdíly lze vidět na Graf 3. Zatímco teplota okolí nemá zásadní vliv na součinitel tepla, což lze vidět na křivkách, které se pro stejnou teplotu vody

téměř překrývají. Zásadní vliv má změna teploty vody, neboť pro jinou teplotu se křivky také překrývají. Proto lze vidět rozdíl pro stejný průměr kapky při jiné hodnotě teploty vody. Tento rozdíl je přibližně tisíc W/m²K. Díky tomuto rozdílu mohou být následně měrné tepelné toky v rozdílu desetitisíců. Teplota použité vody je tedy velmi důležitý faktor, který ovlivňuje zamrznání kapičky.

Pro následný odvod tepla při ochlazení kapičky na 0 °C, je ovlivnění času touto teplotou v řádu setin, případně tisícín. Tento čas je zanedbatelný, neboť kapičky jsou malých rozměrů. Následně nemá teplota výstupní vody vliv na čas změny fáze, poněvadž změna začíná vždy při 0 °C. Množství vypouštěné vody má značný vliv na mrznutí kapičky. Proud vzduchu má určité množství chladu, které může voda odebrat. Toto množství je závislé na rychlosti proudění vzduchu a objem vypouštěné vody je regulován tak, aby všechna vypuštěná voda stihla zamrznout.

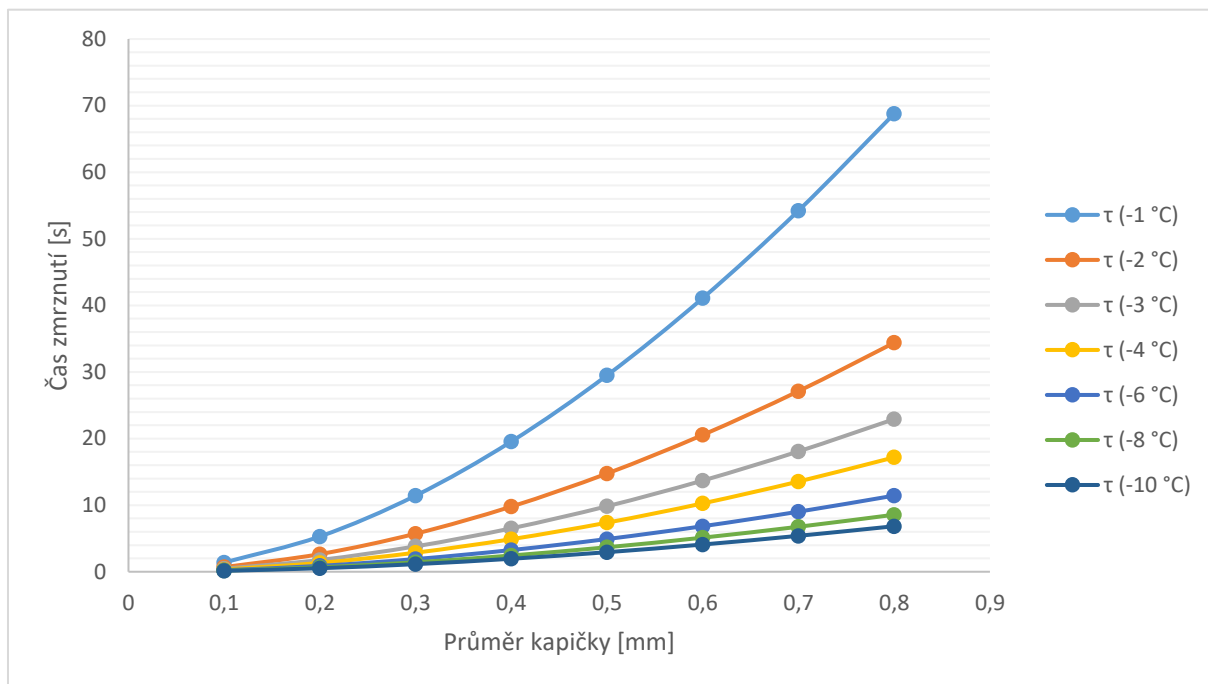
Čas zmrznutí kapičky byl vypočítán dle rovnic (10), (11), (12), pomocí programu Microsoft Excel.

τ celkový (voda 1 °C)							
d	τ (-1 °C)	τ (-2 °C)	τ (-3 °C)	τ (-4 °C)	τ (-6 °C)	τ (-8 °C)	τ (-10 °C)
mm	s	s	s	s	s	s	s
0,1	1,3914	0,6960	0,4641	0,3481	0,2320	0,1739	0,1391
0,2	5,3003	2,6511	1,7674	1,3253	0,8831	0,6619	0,5291
0,3	11,4315	5,7171	3,8109	2,8574	1,9035	1,4263	1,1399
0,4	19,5601	9,7813	6,5194	4,8877	3,2553	2,4387	1,9486
0,5	29,5037	14,7524	9,8318	7,3703	4,9078	3,6759	2,9365
0,6	41,1098	20,5539	13,6970	10,2670	6,8354	5,1188	4,0884
0,7	54,2480	27,1206	18,0716	13,5450	9,0164	6,7509	5,3910
0,8	68,8054	34,3960	22,9179	17,1761	11,4317	8,5580	6,8330

Tabulka 18: Celkový čas zmrznutí kapičky v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 1 °C

τ celkový (voda 2 °C)							
d	τ (-1 °C)	τ (-2 °C)	τ (-3 °C)	τ (-4 °C)	τ (-6 °C)	τ (-8 °C)	τ (-10 °C)
mm	s	s	s	s	s	s	s
0,1	1,3919	0,6966	0,4647	0,3486	0,2324	0,1743	0,1394
0,2	5,3011	2,6526	1,7690	1,3268	0,8844	0,6630	0,5301
0,3	11,4316	5,7192	3,8134	2,8598	1,9056	1,4282	1,1416
0,4	19,5582	9,7833	6,5223	4,8908	3,2581	2,4412	1,9508
0,5	29,4984	14,7535	9,8346	7,3737	4,9112	3,6790	2,9392
0,6	41,0993	20,5531	13,6992	10,2702	6,8390	5,1222	4,0914
0,7	54,2308	27,1171	18,0725	13,5476	9,0198	6,7543	5,3941
0,8	68,7800	34,3888	22,9168	17,1776	11,4348	8,5613	6,8361

Tabulka 19: Celkový čas zmrznutí kapičky v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 2 °C



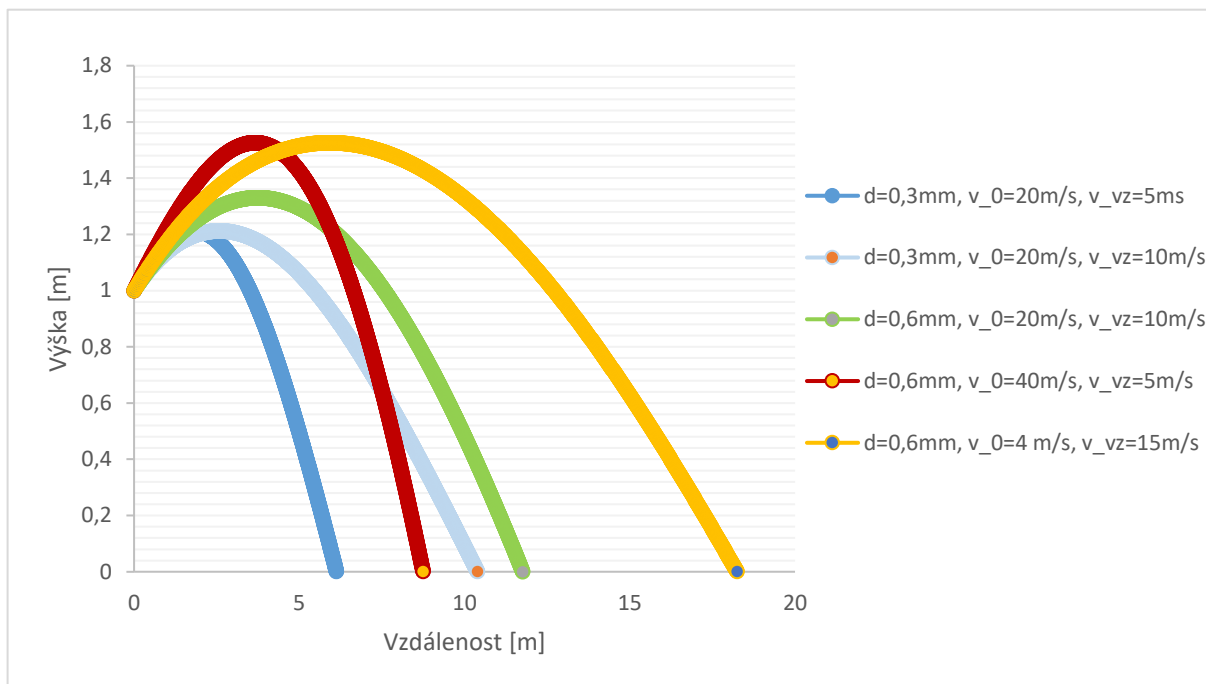
Graf 4: Závislost času zmrznutí na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 2 °C

V Tabulka 18 a Tabulka 19 lze vidět, že při použití vody o teplotě 1 °C nebo 2 °C se čas zmrznutí liší v desetinách sekundy. Na Graf 4 lze vidět, že s rostoucím průměrem kapky roste čas jejího zmrznutí. U kapek stejného průměru lze vidět, jak je jejich zmrznutí ovlivněno teplotou okolí. Pokud bychom chtěli vyrábět technický sníh o poloměru kapiček 0,8 mm při venkovní teplotě -1 °C, trvalo by její zmrznutí téměř 69 sekund. Což by při její pádové rychlosti znamenalo, že by musela být pro její dokonalé zmrznutí pouštěna z výšky 269 metrů. Teplota okolí je jeden z hlavních faktorů ovlivňující zmrznutí. Na výše zmíněném rozmezí deseti stupňů celsia klesne čas zmrznutí u teploty -10 °C přibližně na desetinu času oproti času potřebnému při -1 °C.

7.7 Trajektorie kapičky ze sněžného děla

U sněžných děl je trajektorie letu kapky jiná než u sněžných tyčí. Zatímco u sněžných tyčí můžeme považovat trajektorii pouze za padající, tudíž lze uvažovat volný pád, u sněžných děl uvažujeme o šikmém vrhu. Voda je tryskou rozstříknuta do izotermního proudu vzduchu hnaného ventilátorem. Rychlost proudu byla odečtena přibližně na 20–40 m/s. Záleží ovšem na výkonu děla a typu ventilátoru. Kapička vody o velmi malé hmotnosti je unášena tímto proudem a okamžitě ustálí svoji rychlost na tu jeho. Rychlost proudu je konstantní s rychlostí z ventilátoru, a to v krajní oblasti, která je přibližně čtyřnásobek průměru výusti, z které proud vzduchu vychází. [45]

Na kapku při letu působí aerodynamický odpor. Kapka je stejné velikosti jako u sněžné tyče, ale protože je nesena rychlostí výše zmíněného proudu, působí na ni dle rovnice (5) daleko větší odporová síla. Tato síla mění trajektorii do tvaru balistické křivky. [46]



Graf 5: Trajektorie dráhy kapiček ze sněžného děla

Na Graf 5 lze vidět trajektorie kapek ze sněžného děla. Kapka je vnesena do proudu vzduchu, který ji „vystřelí“ do prostředí. Sněžné dělo má určitou velikost, přičemž výust' děla je přibližně ve výšce 1 metru. Na Graf 5 jsou znázorněny trajektorie pro kapky o různých průměrech a horizontální rychlosti proudění vzduchu. Střední rychlost vzduchu je konstantní a je uvedena u jednotlivých trajektorií. Děla se dávají po směru foukajícího větru, aby kapička doletěla dále a byla ve vzduchu nejdelší možnou dobu. Popis je proveden červeně znázorněnou trajektorií. V první části trajektorie lze vidět, že dráha letu má lineární závislost. Je to místo, kde je kapka unášena proudem vzduchu. Má konstantní rychlost, a to do vzdálenosti přibližně 3 metry. Díky odporové síle kapka zpomaluje, a to tak, až je její rychlost a její stoupání ve směru pohybu nulové. Tento jev lze vidět od 3 do 4,5 metru letu. Následně začne padat. Propadává vzduchem a díky její malé hmotnosti je unášena větrem. Urazí velké vzdálenosti, které lze vidět na obrázku na straně 18.

Lze vidět, že křivky nejsou shodné s křivkami pro šikmý vrh, ale připomínají balistické křivky. Trasa, kterou kapička urazí je nejvíce ovlivněna rychlostí proudícího vzduchu v prostředí. Tento rozdíl můžeme vidět mezi modrými trajektoriemi. Při střední rychlosti větru 5 m/s urazí kapička s počáteční rychlostí 20 m/s přibližně 6 metrů, zatímco při stejné počáteční rychlosti a foukání 10 m/s urazí 10 metrů. Tutu diferenci můžeme vidět také mezi červenou a žlutou křivkou, kdy pro rozdíl rychlostí větru 5 m/s a 15 m/s dorazí kapka o 10 metrů delší vzdálenost. Rychlost proudění má větší vliv na vzdálenost, kterou urazí, než počáteční rychlost. To lze vidět mezi červenou a zelenou křivkou. Zelená urazí větší vzdálenost přibližně o 3 metry i přesto, že její počáteční rychlost je dvakrát menší, ale proudění vzduchu dvakrát větší.

Na grafu jde také vidět, že větší kapičky urazí větší vzdálenost. Je to z toho důvodu, že mají větší kinetickou energii. Vezmeme si počáteční bod, kde je kapička vržena do proudu

vzduchu hnaného ventilátorem. Okamžitě dosáhne rychlosti jako tento proud vzduchu. Její kinetická energie je tedy:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_k \cdot v_0^2 \quad (25)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho_k \cdot V_k \cdot v_0^2 \quad (26)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho_k \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot v_0^2$$

$$E_k \sim d^3$$

Proti ní působí energie disipační, která těleso brzdí:

$$E_d = F \cdot v \quad (27)$$

V našem případě se jedná o odporovou sílu a proto můžeme vzorec upravit:

$$E_d = F_o \cdot v_0 \quad (28)$$

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_{vz} \cdot S \cdot v_0^2 \quad (29)$$

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_{vz} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v_0^2$$

$$E_d \sim d^2$$

Lze vidět, že kinetická energie roste s třetí mocninou, zatím co disipační energie roste s druhou mocninou. Vyplývá tedy, že čím bude mít těleso větší průměr, tím tento rozdíl bude narůstat. Pokud bychom tedy uvažovali nekonečně velké těleso, už by se pomocí disipační energie nedokázalo zastavit. Můžeme tedy říct, že čím je kapička větší, tím doletí dále.

8 Konstrukční návrh

Cílem této kapitoly je navrhnout sněžnou tyč, která při teplotě prostředí -8 °C dokáže zmrazit 12 litrů vody za minutu. Relativní vlhkost vzduchu byla zvolena na 90 %. Pro výpočet se předpokládá kulový tvar kapiček o teplotě přicházející vody 1 °C .

Aby došlo ke kompletnímu zmrazení kapičky, je potřeba, aby byla v prostředí dostatečně dlouhou dobu a mohlo tak dojít ke kompletní přeměně vody na led. Je tedy nutné vypočítat čas potřebný na zmrznutí a poté určit výšku tyče, z které k přeměně dochází.

Sněžné tyče mohou být dvojího provedení. U prvního dochází k vypouštění vody a vzduchu zvlášť. U druhého dochází ke smíchání těchto tekutin ve směšovací komoře a následně k jejich vypuštění. Pro výpočet tyče se uvažuje vypouštění tekutin zvlášť. Voda je vypouštěna a proud vzduchu ji „trhá“ na ještě menší kapičky. Vzduch může být dodáván z centrálního vzduchového kompresoru nebo je kompresor přimontován přímo na tyči. Vzduch se do něj nasaje z okolního prostředí a následně je stlačen. Při stlačení se vzduch ohřeje, a proto je nutné ho po stlačení nechat ochladit. K ochlazení dochází většinou v trubce, přes kterou chladne. Díky tomu je zajištěno, že je stlačen a má příznivou teplotu na výstupu z tyče.

Je uvažováno, že kapičky mají po vypuštění z trysky a „roztrhání“ vzduchem velikost $0,4\text{ mm}$ a teplotu 1 °C . Výpočty se počítají podle stejných rovnic jako v kapitole 7. a byly provedeny v softwaru Microsoft Excel.

Nejprve je třeba vypočítat rychlost padající kapky. Tu můžeme zjistit z Tabulka 15 na straně 37. Rychlost pro kapičku o velikosti $0,4\text{ mm}$ v prostředí o teplotě -8 °C vychází $2,7358\text{ m/s}$. Následně pomocí Tabulka 16 zjistíme čas zmrznutí kapičky. Ten vychází na $2,4387\text{ sekundy}$. Z času potřebného na zmrznutí a rychlosti, již se pohybuje, určíme dle rovnice (13) výšku, z které kapička zmrzne:

$$h = v \cdot \tau_{celk} \quad (13)$$

$$h = 2,7358 \cdot 2,4387$$

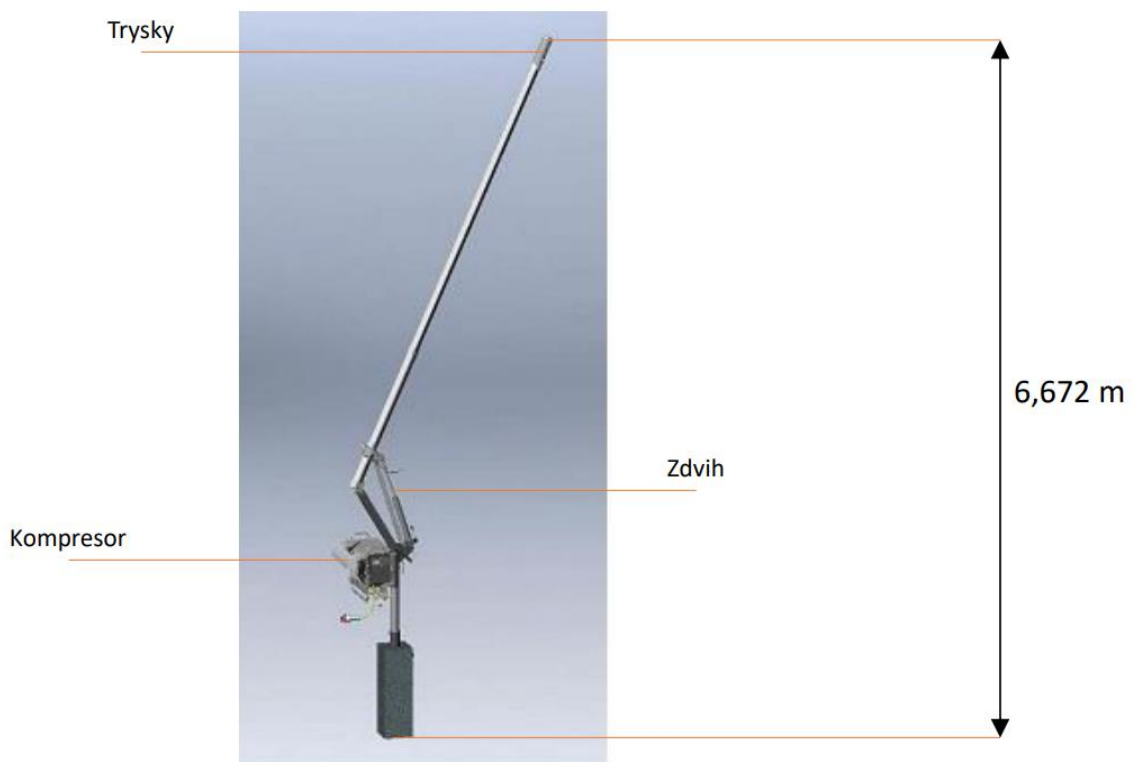
$$h = 6,672\text{ m}$$

Z výpočtu lze vidět, že pro dané parametry je minimální výška pro zmrznutí $6,672\text{ m}$. Pokud by sněžná tyč byla menší než výška, z které kapička zmrzne, nedošlo by u ní před jejím dopadem ke kompletnímu zmrznutí.

Potřebná výška (1 °C)							
d	h (-1 °C)	h (-2 °C)	h (-3 °C)	h (-4 °C)	h (-6 °C)	h (-8 °C)	h (-10 °C)
mm	m	m	m	m	m	m	m
0,1	1,927	0,962	0,640	0,479	0,318	0,238	0,190
0,2	10,382	5,183	3,449	2,582	1,714	1,280	1,020
0,3	27,423	13,690	9,109	6,818	4,526	3,379	2,691
0,4	54,183	27,046	17,994	13,467	8,937	6,672	5,312
0,5	91,374	45,607	30,340	22,704	15,065	11,244	8,951
0,6	139,470	69,607	46,302	34,645	22,984	17,152	13,651
0,7	198,789	99,204	65,985	49,369	32,747	24,433	19,443
0,8	269,542	134,503	89,458	66,926	44,386	33,111	26,345

Tabulka 20: Minimální potřebná výška na zmrznutí kapičky v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 1 °C

V Tabulka 20 je vidět, jak se mění výška zasněžovací tyče v závislosti na změně parametrů. Modře vyznačené výšky jsou pro zasněžovací tyč příznivé, červené nikoliv. Je to z toho důvodu, že sněžné tyče bývají vyráběny o výšce od 4 do 10 metrů. Proto byly v Tabulka 20 zeleně vyznačeny výšky, které odpovídají nebo jsou blízko hodnotám vyráběných sněžných tyčí. Na námi zvoleném návrhu lze vidět, že pokud by okolní teplota byla $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, stačí výška zasněžovací tyče 5,312 metrů, ale pokud by stoupla na $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, byla by potřeba tyč 54,183 metrů. Tato výška je značně větší, než se sněžné tyče vyrábí. Lze vidět, že pro teplotu okolí $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ je námi zvolený průměr jediný možný, aby velikost tyče odpovídala těm vyráběným. Z tabulky vyplývá, že příznivých výšek je pro každý průměr pouze pár, a to pro kapičky 0,2–0,5 mm. Například pokud bychom chtěli vyrábět kapičky o velikosti 0,5 milimetrů, je příznivá teplota pouze $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud o velikosti 0,6 milimetrů a větší, musí být teplota ještě menší, jelikož pro námi zvolené teploty neodpovídá žádná výška vyráběným typům. Je lepší vyrábět menší kapičky, u kterých dochází k rychlejšímu, a hlavně kompletnímu zmrazení do požadované výšky tyče.



Obrázek 13: Sněžná tyč (převzato z [47], upraveno)

Na Obrázek 13 je zobrazena sněžná tyč. Tyč obsahuje kompresor, zdvih a hlavu, která obsahuje trysky. Zdvih je zde z důvodu, že se tyče vyrábí na metry, dle požadované výšky. Výšku lze následně upravovat právě pomocí zdvihu. Pro námi vypočítanou výšku 6,672 metru, by byla vybrána 7metrová tyč, u které by se výška upravila pomocí zdvihu ramene. Pomocí této regulace je zvýšena schopnost sněžných tyčí vyrábět technický sníh i při jiných podmínkách. Například pokud bychom chtěli vyrábět sníh o velikosti 0,3 mm a měli desetimetrovou tyč, můžeme pomocí regulace zdvihu vyrábět jak při $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, tak i při $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud bychom ovšem měli tyč 6 metrů vysokou, lze sníh vyrábět pouze při teplotách $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

K zajištění dostatečného množství chladu pro ochlazení a zmrznutí vypouštěného množství vody je potřeba určit rychlost vzduchu. Musí být zajištěno dostatečné množství dodávaného vzduchu s potřebným chladem.

Chladicí výkon jednoho metru krychlového určíme podle rovnice (15):

$$Q_{ch,1} = V_{vz,1} \cdot c_{p,vz} \cdot \rho_{vz} \cdot (T_w - T_\infty) \quad (15)$$

$$Q_{ch,1} = 1 \cdot 1\,010 \cdot 1,341 \cdot (2 - (-8))$$

$$Q_{ch,1} = 12\,193,997\,W$$

Z rovnice (13) víme potřebnou výšku na zmrznutí kapičky. Pokud budeme uvažovat, že propadá vzduchem o průměru $1\,m^2$, můžeme určit objem vzduchu, kterým propadá podle rovnice (14):

$$V_{vz} = S_{1m} \cdot h \quad (14)$$

$$V_{vz} = 1 \cdot 6,672$$

$$V_{vz} = 6,672\,m^3$$

Ze znalosti chladicího výkonu a objemu vzduchu, kterým voda propadáva můžeme vypočítat chladicí výkon celého vzduchu v tomto prostoru:

$$Q_{ch} = V_{vz} \cdot Q_{ch,1} \quad (30)$$

$$Q_{ch} = 6,672 \cdot 12\,193,997$$

$$Q_{ch} = 81\,356,548\,W$$

Tepelný tok, kterým je odebíráno teplo kapičky je vypočítán dle rovnice (8):

$$\dot{Q} = \bar{\alpha} \cdot A \cdot (T_w - T_\infty) \quad (8)$$

$$\dot{Q} = 3\,466,63 \cdot 5,0266 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - (-8))$$

$$\dot{Q} = 0,01566\,W$$

Kapičky je během její doby ve vzduchu odebráno teplo dle rovnice:

$$\dot{Q}_k = \dot{Q} \cdot \tau_{celk} \quad (31)$$

$$\dot{Q}_k = 0,01566 \cdot 2,4387$$

$$\dot{Q}_k = 0,0382\,W$$

Sněžná tyč má vypouštět 12 litrů vody za minutu, což odpovídá 0,2 litrů vody za sekundu. Víme průměr kapiček, který je 0,4 mm. Z těchto údajů vypočteme množství vypouštěných kapek, které odpovídá, 0,2 litru:

$$n_k = \frac{V_{vody}}{V_{kapky}} \quad (32)$$

$$n_k = \frac{0,2}{5,0266 \cdot 10^{-4}}$$

$$n_k = 5\,968\,310$$

Z celkového počtu kapek obsažených v 0,2 litrech vypouštěné vody a tepla odebraného kapičky během jejího letu lze určit celkové odebrané teplo:

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_k \cdot n_k \quad (33)$$

$$\dot{Q}_v = 0,0382 \cdot 5\,968\,310$$

$$\dot{Q}_v = 227\,959,15\,W$$

Ze známého chladu v objemu vzduchu a chladu odebraného vodě zjistíme potřebnou výměnu vzduchu, která při ploše propadávající plochou 1 m² odpovídá rychlosti větru:

$$v_{vz} = \frac{\dot{Q}_v}{\dot{Q}_{ch}} \quad (34)$$

$$v_{vz} = \frac{227\,959,15}{81\,356,55}$$

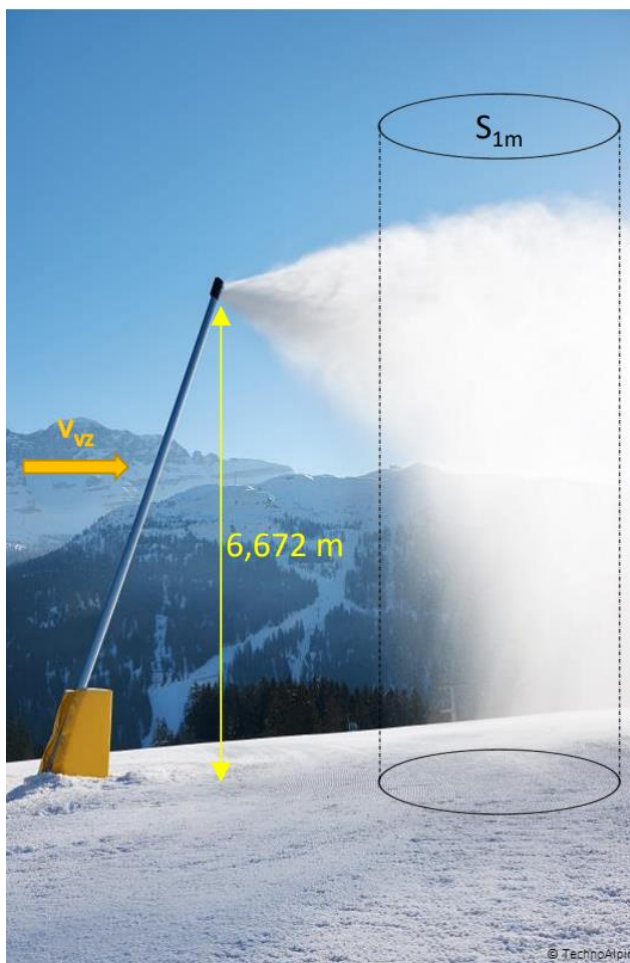
$$v_{vz} = 2,802\,m/s$$

Pro námi zvolené parametry kapičky a prostředí, aby došlo k dostatečnému dodání chladu a zamrznutí kapičky je potřeba rychlost vzduchu 2,802 m/s.

Rychlost vzduchu (1 °C)							
d	v _{vz} (-1 °C)	v _{vz} (-2 °C)	v _{vz} (-3 °C)	v _{vz} (-4 °C)	v _{vz} (-6 °C)	v _{vz} (-8 °C)	v _{vz} (-10 °C)
mm	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0,1	79,355	79,229	79,104	78,980	78,736	78,495	78,259
0,2	14,735	14,714	14,693	14,672	14,631	14,591	14,552
0,3	5,580	5,573	5,565	5,558	5,544	5,530	5,517
0,4	2,825	2,822	2,818	2,815	2,808	2,802	2,796
0,5	1,676	1,674	1,672	1,670	1,666	1,663	1,660
0,6	1,098	1,097	1,096	1,095	1,092	1,090	1,089
0,7	0,771	0,770	0,769	0,768	0,767	0,766	0,764
0,8	0,568	0,568	0,567	0,567	0,566	0,565	0,564

Tabulka 21: Potřebné rychlosti vzduchu v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 1 °C

Z Tabulka 21 lze vidět, že rychlost větru závisí hlavně na průměru kapky. Je to z toho důvodu, že se snižujícím se průměrem dochází k rychlejšímu zamrznutí kapičky a snižuje se tak výška sněžné tyče. Proto je potřeba získat chlad na zmrazení právě větší výměnou větru. Zelenými barvami byly znázorněné odpovídající rychlosti pro realistické výšky sněžných tyčí. U velkých průměrů kapek je potřeba velká výška sněžné tyče a dlouhý čas zmrznutí. Proto by na zmrznutí kapičky stačil chlad, který je obsažen v prostředí, kterým propadává. Sněžné tyče dokážou vypouštět vodu do větší plochy, již kapky propadají. Díky tomu je možné vypouštět větší objem vody, který zmrzne.



Obrázek 14: Sněžná tyč (převzato z [48], upraveno)

Sněžná tyč, pro kterou byl proveden konstrukční návrh bude schopná vyrábět umělý sníh při průtoku vody 0,2 l/s při teplotě prostředí $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a o rychlosti větru 2,802 m/s a výších. Příznivějšími podmínkami pro výrobu umělého sněhu jsou větší mráz a rychlost proudění. Je tedy nutné vybrat ideální poměr mezi velikostí vyráběného technického sněhu a klimatickými podmínkami. K zjištění aktuálních podmínek jsou podél sněžných tratí, v jejich blízkosti nebo přímo na sněžných zařízeních umístěny meteorologické stanice, které určují přesná klimatická data. Díky nim se mohou nastavit nejlepší možné parametry tyčí pro výrobu umělého sněhu.

9 Závěr

Diplomová práce seznamuje se sněžnými zařízeními. Rešeršní část se zabývá historií a rozmachem umělého zasněžování. Následuje popis rozdílů mezi přírodním a umělým sněhem. Jsou popsány procesy a metody vzniku umělého sněhu.

Sněžná zařízení pomáhají zajistit dostatek sněhu pro včasné otevření zimních středisek. V dnešní době bychom se bez nich kvůli teplým zimám neobešli. Mezi nejznámější zařízení patří sněžná děla. Dokážou vyrábět přes 100 m³ sněhu za hodinu a rozpráší ho do vzdálenosti až 80 metrů. Sníh ovšem vyrábí pouze při záporných teplotách okolního prostředí. Další zařízení na výrobu umělého sněhu jsou sněžné tyče. Ty za hodinu vyprodukují 60 m³ umělého sněhu, ale také pouze při záporných teplotách. Používají se na užších sjezdovkách a pro tvorbu vrchní vrstvy.

Velký rozmach zažívají snowmakery. Jedná se o zařízení produkující sníh i při plusových teplotách prostředí. Bývají využívány jako doplněk k ostatním sněžným zařízením. Existuje jich několik typů, přičemž většina výrobců má svůj způsob výroby patentován. Snowmakery Snowfactory od firmy TechnoAlpin a SnowMagic dokážou vyrobit kolem 100 m³ za den, zatím co snowmaker VIM od firmy IDE Technologies dokáže vyrábět až 1 720 m³ za den. Je to způsobeno rozdílnou technologií výroby.

Důležitým faktorem u výroby umělého sněhu je cena. Pokud by cena na výrobu sněhu byla vysoká, náklady by mohly převýšit výdaje. V tu chvíli by nebyl zisk a lyžařská střediska by byla ztrátová. Proto je snaha vyrábět umělý sníh co nejlevněji. Z tohoto důvodu se stále hledají nová řešení, aby sněžná zařízení byla výkonnější při stejné nebo ještě lépe s nižší spotřebou.

Zařízení dokážou produkovat přes stovky tun sněhu. Proto byly ceny na výrobu přepočítány na cenu za tunu produktu. Zásadní vliv na cenu vyrobeného sněhu má zdroj použité vody. Jestliže je použit přírodní zdroj, jsou ušetřeny náklady na vodné, které v roce 2020 čítalo 45,27 Kč. Cena za vyrobenou tunu sněhu pomocí sněžného děla činí 2,28–2,94 Kč, je-li použit přírodní zdroj vody. Pokud bychom vzali vodu z vodního řádu, cena za vyrobené množství je 43,02–48,96 Kč. U sněžných tyčí je cena při použití přírodního zdroje 0–1,3 Kč a 45,91–49,20 Kč za tunu sněhu. Zajímavá je hodnota 0 Kč. U těchto tyčí nejsou potřeba žádné náklady na jejich provoz. Pracují s potenciální energií vody. Vodní nádrž se nachází nad výškovou hladinou tyče a rozstříknutí tekutiny je zajištěno tlakem vody. S těmito tyčemi zatím probíhají experimenty, ale je velká pravděpodobnost, že zažijí velký rozmach. Nejvyšší náklady na vyrobený sníh mají snowmakery. Cena u TechnoAlpin a SnowMagic je 205,75–345,15 Kč s přírodním zdrojem a 264,42–416,95 Kč z placeného zdroje. VIM vyrábí sníh

za 40,57–48,04 Kč z přírodní zásobárny a 85,62–93,44 Kč z placené. I při použití přírodních zásob vody vychází částka v rapidně vyšších číslech. Vezmeme-li v úvahu, že vyrobí stovky tun sněhu, je částka v desítek tisíc korun. Z tohoto důvodu jsou využívány jen jako pomocný zdroj.

Výpočtová část se zabývá modelem zmrznutí kapičky vypuštěné ze sněžného zařízení. Model zohlednil parametry prostředí a kapičky, která byla vypuštěna ze sněžné tyče. Pohyb kapičky je tedy kolmý dolů. Tato dráha byla vybrána z důvodu, že je nejkratší možná k zemi a kapička tak stráví nejmenší možnou dobu ve vzduchu. Pokud by byla rozstříknuta pod jiným úhlem, strávila by ve vzduchu delší čas. Hodnoty tekutin byly získány pomocí programu Steam Calculator a skript Přenos tepla a látky [44]. Výpočty byly provedeny pomocí programu Microsoft Excel. Realizovaly se pro velikosti kapičky 0,1–0,8 mm, vybrané teploty

prostředí od $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotu vypouštěné vody $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. V rovnicích je popsán vzorový výpočet pro velikost vypouštěné kapičky $0,3\text{ mm}$ o teplotě $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ do prostředí $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro tento model vyšel čas zmrznutí $1,1415$ sekundy a minimální výška vypuštění $2,695$ metru. Následně jsou v tabulkách a grafech uvedeny vypočtené výsledky pro zvolené velikosti a rozmezí teplot. Na Graf 2 lze vidět, že pádová rychlost závisí hlavně na průměru kapičky, neboť pro zvolené rozmezí teplot se křivky téměř překrývají. Na Graf 3 můžeme vidět, že součinitel přestupu tepla závisí především na teplotě vypouštěné vody. Pokud je teplota vypouštěné vody stejná a mění se teplota prostředí, pro stejné průměry se křivky prakticky překrývají. Na jednom stupni rozdílu vypouštěné vody je difference $1\text{--}2$ tisíce $\text{W/m}^2\text{K}$. V Tabulka 18 a Tabulka 19 je vidět, že pro rozdíl zvolených teplot vypouštěné vody se čas zmrznutí liší nepatrně v řádu setin. Např. u kapičky průměru $0,8\text{ mm}$ a teplotě prostředí $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ se liší čas zmrznutí pro teplotu vypouštěné vody $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $0,02\text{ s}$. Při menších kapičkách a nižších teplotách jsou rozdíly ještě menší. Z Graf 4 je patrné, že čas zmrznutí ovlivňuje převážně teplota prostředí. Čím nižší je teplota, tím rychleji kapička zamrzá. U stejné velikosti kapiček je zmrznutí při $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ desetkrát rychlejší než při $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se zmenšujícím se průměrem kapičky se čas zamrzání také snižuje. Při relativní vlhkosti $80\text{ }\%$ je u kapiček o průměru $0,2\text{ mm}$ a více odpařený objem pod $0,2\text{ }\%$. Pro výpočet zamrzání, kdy relativní vlhkost přesahuje $80\text{ }\%$ lze tedy odpařování kapičky zanedbat.

Trajektorie ze sněžného děla popisuje tvar balistické křivky. Na Graf 5 lze vidět, že trajektorie je značně ovlivněna foukáním větru, který je příznivým faktorem pro zamrzání kapičky. Bylo zjištěno, že kapičky o větším průměru doletí dále než kapičky průměru menšího.

V konstrukčním návrhu byla navržena sněžná tyč pro zadané podmínky včetně objemu vypouštěné vody. Ty byly stanovené na velikost kapičky $0,4\text{ mm}$ o teplotě $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Voda je rozstříknuta do prostředí o teplotě $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Byla vypočtena výška tyče na $6,672$ metru. Tyče se vyrábí od 4 do 10 metrů výšky, proto by byla vybrána 7 metrová tyč. Výšku lze následně regulovat pomocí zdvihu. V Tabulka 20 jsou vypočteny minimální potřebné výšky na zmrznutí kapičky. Rozmezí vyráběným tyčím odpovídají zeleně vyznačené výšky. Lze vidět, že pro každou velikost kapičky odpovídá pouze pár teplot prostředí. Z tohoto důvodu je třeba optimalizovat velikost kapičky vůči výšce tyče a aktuálním klimatickým podmínkám.

V Tabulka 21 jsou zaneseny potřebné rychlosti větru, aby došlo k dostatečné výměně vzduchu a byl zajištěn přísun chladu pro zmrznutí. Zeleně byly vyznačeny rychlosti odpovídající vyráběným tyčím. Můžeme postřehnout, že rychlost proudění je závislá převážně na průměru kapky než na teplotě prostředí. Je to z důvodu, že pro nižší teploty je sice potřeba nižší výška tyče, ale kapička rychleji zamrzne. Proto pro stejný průměr kapičky vychází téměř stejné hodnoty proudění vzduchu.

Práci by bylo možné rozvinout do experimentu, kdy by se v přesně nastavených podmínkách v laboratoři ověřily vypočtené výsledky, které v práci vychází. Také by bylo přínosné zjistit rychlosti proudu vzduchu z ventilátorových děl. Tento údaj neudává žádný výrobce a je téměř nezjistitelný i pro velké firmy. Nebylo možné ho získat ani anemometrem, neboť z důvodu covidové krize lyžařská střediska nefungují.

Seznám použitých zdrojů

- [1] První zasnežování v Čechách - reportáž. *Fs.cvut* [online]. 2020 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/aktuality/1417-212/prvni-zasnezovani-v-cechach-reportaz/>
- [2] První umělý sníh v socialistickém bloku. V Telnici jsou sněhová děla od 60. let. *Lidovky.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: https://www.lidovky.cz/byznys/firmy-a-trhy/prvni-umely-snih-v-socialistickem-bloku-v-telnici-jsou-snehova-dela-od-60-let.A151108_112618_firmy-trhy_mct
- [3] *Pierre Paccard. Gestion durable de l'eau en montagne : le cas de la production de neige en stations de sports d'hiver.. Géographie. Université de Savoie, 2010. Français. (tel-00572604v2)* [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/576192/filename/These_NCT_13032011_light.pdf
- [4] *MAGNIER Elodie, 2013, Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse)* [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB_2CF6D7B4A642.P001/REF
- [5] ZEŽULA, Petr. 45 let provozu prvního lyžařského vleku na Vysočině – lyžařský areál na Fajtově kopci ve Velkém Meziříčí. *Skivm.cz* [online]. 2011 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.skivm.cz/ski-areal/historie/137-45-let-provozu-prvniho-lyzarskeho-vleku-na-vysocine-lyzarsky-areal-na-fajtove-kopci-ve-velkem-mezirici>
- [6] HAHN, Felix. *Künstliche Beschneidung im Alpenraum* [online]. In: . 2004 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: https://www.cipra.org/de/publikationen/2709/454_de/inline-download
- [7] KNOT, Libor. *Technický sníh přírodu neničí Mýty a skutečnost o technickém zasnežování sjezdových tratí* [online]. In: . 2018 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: https://www.ahscr.cz/media/uploads/dokumenty_pdf/pr-zasnezovani-myty_a_realita-fin_3.pdf
- [8] VODIČKOVÁ, Kateřina. *Jak vznikají sněhové vločky?* [online]. 2018 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.meteopress.cz/vysvetleni/jak-vznikaji-snehove-vlocky/>
- [9] PEŠTOVÁ, Zuzana. *Technický vs. přírodní sníh. Meteopress.cz* [online]. 2019 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.meteopress.cz/vysvetleni/technicky-vs-prirodni-snih/>
- [10] ZÁHOROVÁ, Věra. *CHLAZENÍ TROCHU JINAK – VÝROBA TECHNICKÉHO SNĚHU*. In: *Arecosnow.cz* [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <http://www.arecosnow.cz/download/chlazení.pdf>
- [11] *Technické zasnežování – spása, nebo zkáza?*. 2014, , 24-25 s. ISSN 1210-3004. Dostupné také z: <https://www.geograficke-rozhledy.cz/archiv/clanek/299/pdf>
- [12] *Sjezdové lyžování a ochrana přírody*. 2009, , 8-10 s. Dostupné také z: <https://www.casopis.ochranaprirody.cz/pece-o-prirodu-a-krajinu/sjezdove-lyzovani-a-ochrana-prirody>
- [13] BADRÉ, Michel, Jean-Louis PRIME a Georges RIBIÈRE. *Neige de culture : état des lieux et impacts environnementaux - Note socio-économique* [online]. In: . 2009 [cit.

- 2020-11-21]. Dostupné z: <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/094000448.pdf>
- [14] BLAKE, Tanner. Brain Post: How Snow Guns Work. *Snowbrains* [online]. 2020 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://snowbrains.com/how-snow-guns-work/>
- [15] Pro včasnou zimu. *Snowbiz* [online]. 2018 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://snowbiz.cz/pro-vcasnou-zimu/>
- [16] Fan guns. *Technoalpin* [online]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.technoalpin.com/en/snowmaking/snowguns.html>
- [17] Sněžné dělo JC Jägerndorfer TR10 Schneek. auf Unterwagen. In: *Lyze-radotin* [online]. [cit. 2021-01-31]. Dostupné z: <https://www.lyze-radotin.cz/snezne-delo-jc-jagerndorfer-tr10-schneek-auf-unterwagen>
- [18] Fan guns. *Demaclenko* [online]. [cit. 2021-01-31]. Dostupné z: <https://www.demaclenko.com/en/snow-guns/our-snow-guns/40-0.html>
- [19] Sněžná děla ARECO. *Audry* [online]. [cit. 2021-01-31]. Dostupné z: <http://www.audry.cz/snezna-dela-areco>
- [20] Nussy Zero E. *Slf* [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.slf.ch/de/projekte/nussy-zero-e-1.html>
- [21] Snow lances. *Technoalpin* [online]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.technoalpin.com/en/snowmaking/snow-lances.html>
- [22] Lances. *Demaclenko* [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.demaclenko.com/en/lances/our-lances/42-0.html>
- [23] Katalog. *Lubomir-rek* [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.lubomir-rek.cz/katalog.pdf>
- [24] Snowmaking. *Bachler* [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.bachler.ch/en/Snowmaking>
- [25] ZASNĚŽOVACÍ TYČE VIS UP. In: *Snehovadela* [online]. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <http://snehovadela.cz/userfiles/image/VIS%20sneh.png>
- [26] *Snow*. 2008, , 40-41 s. ISSN 1214-0007. Dostupné také z: https://issuu.com/snow.cz/docs/snow_39_celek_150dpi?mode=embed&layout=http%3A%2F%2Fskin.issuu.com%2Fv%2Fflight%2Flayout.xml&showFlipBtn=true. SNOWMAKER: poroučíme sněhu.
- [27] Snowfactory. *Technoalpin* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.technoalpin.com/en/snowmaking/snowfactory.html>
- [28] VAVRDA, Lukáš. TOVÁRNA NA SNÍH SNOWFACTORY – TECHNICKÝ SNÍH I V PŮLI LÉTA?. *Snow* [online]. 2016 [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://snow.cz/clanek/4254-tovarna-na-snih-snowfactory-technicky-snih-i-v-puli leta>
- [29] Snow Background. In: *Cleanpng* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.cleanpng.com/png-technoalpin-armatka-niena-snow-industrial-desi-3367129/preview.html>
- [30] How do snow machines work?. *Snowmagic* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.snowmagic.com/how-do-snow-machines-work/>

- [31] Plate Ice Machine. In: *Linskyicemachine* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <http://www.linskyicemachine.com/images/The%20diagram%20of%20plate%20ice%20machine%20working%20principle.jpg>
- [32] Snow making system. *Snowmagic* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.snowmagic.com/snow-making-system/>
- [33] VIM. *Ide-tech* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.ide-tech.com/en/vim/>
- [34] IDE Technologies Ensures a White Winter with License of its Proprietary Vacuum Ice Maker Technology for Snowmaking. *Globenewswire* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/08/21/1904894/0/en/IDE-Technologies-Ensures-a-White-Winter-with-License-of-its-Proprietary-Vacuum-Ice-Maker-Technology-for-Snowmaking.html>
- [35] *Nhsoft* [online]. In: . [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://nhsoft.dk/work/FG24/mar/Ammon/Minebrochure.pdf>
- [36] Cena elektřiny za kWh opět zdražila. V roce 2020 stojí 4,76 Kč. *Elektrina* [online]. 2020 [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/cena-elektriny-za-kwh-2020-cez-eon-pre-bohemia-centropol-a-d>
- [37] NOVÁK, Petr. Cena vody 2020. *Skrblik* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.skrblik.cz/energie/voda/cena-vody/>
- [38] ROLLE, Kurt C. *Heat and Mass Transfer*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000. ISBN 0-13-919309-X.
- [39] MOHAMMED, Mohammed, Arianne MESSERMAN, Bryan MAYHAN a Kathleen TRAUTH. Theory and Practice of the Hydrodynamic Redesign of Artificial Hellbender Habitat. *Herpetological Review*. 2016, **47**, 586-591.
- [40] KRÁLOVÁ, Magda. ODPOR PROSTŘEDÍ. *Edu.techmania* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/tekutiny/odpor-prostredi>
- [41] Latentní teplo. *Chmi* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/snowmelt/navmenu.php_tab_1_page_4.2.0.htm
- [42] CO JE RELATIVNÍ VLHKOST?. *Flair* [online]. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://flair.cz/relativni-vlhkost>
- [43] KARWA, Rajendra. *Heat and Mass Transfer* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2017 [cit. 2021-04-27]. ISBN 978-981-10-1557-1.
- [44] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [45] LIBERTYMOUNTAINPA. Snowmaking Begins at Liberty Mountain Resort - 11-28-12. *Youtube* [online]. 2012 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=GE8KpPzU_rQ&ab_channel=LibertyMountainPA
- [46] KRÁLOVÁ, Magda. ŠIKMÝ VRH. *Edu.techmania* [online]. [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/pohyb/sikmy-vrh>
- [47] Gemini power. In: *Audry* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: http://www.audry.cz/editor/filestore/Image/Produkty/Snehova_dela/Gemini_power.jpg

- [48] In: *Kovboj.cz* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <http://kovboj.cz/wp-content/uploads/2017/12/TA-Madonna-d.C.-2014-002.jpg>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$\%_{\text{odpar}}$	Procentuální úbytek kapičky	%
\dot{Q}	Tepelný tok	W
μ_{∞}	Dynamická viskozita prostředí	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_w	Dynamická viskozita kapky	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
A	Povrch kapky	m^2
C	Koeficient odporu	-
$c_{p,vz}$	Měrná tepelná kapacita vzduchu	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
d	Průměr	m
E_d	Disipační energie	J
E_k	Kinetická energie	J
F	Síla	N
F_g	Gravitační síla	N
F_o	Odporová síla	N
g	Tíhové zrychlení	m/s^2
h	Minimální výška, z které kapka zmrzne	m
$i_{\text{voda},0}$	Entalpie vody při 0 °C	J/kg
$i_{\text{voda},2}$	Entalpie vody při 2 °C	J/kg
L_f	Skupenské teplo na změnu fáze z vody na led	J
L_v	Latentní teplo na odpaření vody	J
m_k	Hmotnost kapičky	kg
m_{odpar}	Hmotnost odpařené vody	kg
\dot{m}_{odpar}	Hmotnostní úbytek odpařené vody	kg/s
$m_{\text{t, sněhu}}$	Hmotnost tuny sněhu	kg
m_{voda}	Hmotnost vody	kg
n_k	Počet kapiček	-
Nu	Nusseltovo číslo	-
$P_{\text{m3 sněhu}}$	Příkon na výrobu m^3 sněhu	kW
Pr	Prandtlovo číslo	-
$P_{\text{t, sněhu}}$	Příkon na výrobu tuny sněhu	kW
$Q_{2\rightarrow 0}$	Teplo odebrané na ochlazení ze 2 °C na 0 °C	W
Q_{ch}	Chladicí výkon	W
$Q_{\text{ch},1}$	Chladicí výkon 1 m^3 vzduchu	W
Q_k	Teplo odebrané kapičce	W
Q_{rad}	Radiační teplo	W
Re_d	Reynoldsovo číslo	-
r_f	Vnější poloměr kapičky	m
r_i	Vnitřní poloměr kapičky	m

R_t	Odpor tělesa vůči záření	-
S	Čelní plocha kapky	m^2
S_{1m}	Plocha 1 metr čtvereční	m^2
T_∞	Teplota okolního prostředí	$^\circ C$
T_k	Teplota kapky	$^\circ C$
T_S	Teplota, při níž dochází ke změně fáze z vody na led	$^\circ C$
T_w	Teplota povrchu kapky	$^\circ C$
v	Střední rychlost kapky	m/s
v_0	Počáteční rychlost	m/s
V_k	Objem kapky	m^3
v_{led}	Rychlost kapky ledu	m/s
v_{voda}	Rychlost kapky vody	m/s
V_{voda}	Objem vody	m^3
V_{vz}	Objem vzduchu	m^3
v_{vz}	Rychlost vzduchu	m/s
$V_{vz,1}$	Objem 1 m^3 vzduchu	m^3
$\bar{\alpha}$	Součinitel přestupu tepla	$W/m^2 \cdot K$
ϵ	Poměrná zářivost	-
λ	Tepelná vodivost	$W/m \cdot K$
ν_{vz}	Kinematická viskozita vzduchu	m^2/s
ρ_k	Hustota kapky	kg/m^3
$\rho_{sněhu}$	Hustota sněhu	kg/m^3
ρ_{voda}	Hustota vody	kg/m^3
ρ_{vz}	Hustota vzduchu	kg/m^3
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	-
$\tau_{2 \rightarrow 0}$	Čas ba odebrání tepla ze 2 $^\circ C$ na 0 $^\circ C$	s
τ_{celk}	Celkový čas zmrznutí kapky	s
τ_f	Čas změny fáze	s

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Prvky zasněžovacího systému z roku 1954.....	12
Obrázek 2: Vznik technického a přírodního sněhu	14
Obrázek 3: Tabulka závislosti suché teploty na relativní vlhkosti vzduchu	16
Obrázek 4: Etapy fází výroby sněhu	18
Obrázek 5: Sněžné dělo TechnoAlpin TR10	20
Obrázek 6: Sněžná tyč VIS UP	23
Obrázek 7: Schéma výroby sněhu pomocí Snowfactory	24
Obrázek 8: Schéma výroby sněhu pomocí SnowMagic	25
Obrázek 9: Princip výroby by sněhu pomocí VIM	26
Obrázek 10: Diagram uvažovaného postupu	30
Obrázek 11: Rychlost kapky s odporovými silami	33
Obrázek 12: Zmrznutí kapičky	35
Obrázek 13: Sněžná tyč.....	48
Obrázek 14: Sněžná tyč.....	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Parametry vybraných sněžných děl od firmy TechnoAlpin.....	21
Tabulka 2: Parametry vybraných sněžných děl od firmy Demaclenko.....	21
Tabulka 3: Parametry vybraných sněžných děl od firmy Areco	21
Tabulka 4: Parametry vybraných sněžných tyčí od firmy Demaclenko.....	22
Tabulka 5: Parametry vybraných sněžných tyčí od firmy Sufag.....	23
Tabulka 6: Parametry vybraných sněžných tyčí od firmy Bächler	23
Tabulka 7: Parametry vybraných modelů Snowfactory od firmy TechnoAlpin	25
Tabulka 8: Parametry vybrané techniky SnowMagic.....	26
Tabulka 9: Parametry vybraných modelů VIM od firmy IDE Technologies.....	27
Tabulka 10: Ceny za tunu vyrobeného sněhu pomocí vybraných sněžných děl	28
Tabulka 11: Ceny za tunu sněhu vyrobeného pomocí vybraných sněžných tyčí.....	28
Tabulka 12: Ceny za tunu vyrobeného sněhu pomocí vybraných snowmakerů	29
Tabulka 13: Pádová rychlost kapičky vody v závislosti na teplotě prostředí.....	40
Tabulka 14: Pádová rychlost kuličky umělého sněhu v závislosti na teplotě prostředí	40
Tabulka 15: Střední pádová rychlost kapičky v závislosti na teplotě prostředí	40
Tabulka 16: Součinitel přestupu tepla v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 1 °C.....	41
Tabulka 17: Součinitel přestupu tepla v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 2 °C.....	42
Tabulka 18: Celkový čas zmrznutí kapičky v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 1 °C.....	43
Tabulka 19: Celkový čas zmrznutí kapičky v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 2 °C.....	43
Tabulka 20: Minimální potřebná výška na zmrznutí kapičky v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 1 °C.....	47
Tabulka 21: Potřebné rychlosti vzduchu v závislosti na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 1 °C.....	50

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost odpařeného procenta hmotnosti kapičky na okolní teplotě vzduchu při 80 % relativní vlhkosti a teplotě vypouštěné vody 2 °C	39
Graf 2: Závislost střední pádové rychlosti na teplotě prostředí	41
Graf 3: Ukázka závislosti součinitele přestupu tepla v závislosti na teplotě prostředí a teploty vypouštěné vody	42
Graf 4: Závislost času zmrznutí na teplotě prostředí při teplotě vypouštěné vody 2 °C	44
Graf 5: Trajektorie dráhy kapek ze sněžného děla	45